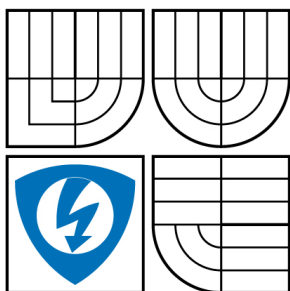


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

MAPOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ V BIOLOGICKÝCH TKÁNÍCH

ELECTROMAGNETIC FIELD MAPPING IN BIOLOGICAL TISSUES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

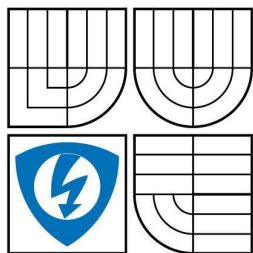
Bc. Martin Bereznanin

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Biomedicínské a ekologické inženýrství

Student: Bc. Martin Bereznanin

ID: 74888

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Modelování elektromagnetických polí v biologických tkáních

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vypracujte modelovou studii tepelných změn při šíření velmi krátkých vln v biologických tkáních. Zaměřte se na využívání mobilních telefonů. Strukturu biologických tkání v lebce člověka zvolte po konzultaci s lékařem. Využijte programové vybavení Comsol-Multiphysics.

Práce musí obsahovat:

- teoretický rozbor problematiky,
- výsledky modelové studie s vyznačením tepelných změn.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Comsol Multiphysics v 3.4a - user manual. <<https://www.comsol.com>>

[2] Pokorný M.: Vícepásmové planární antény. VUT FEKT Brno, 2006,
<www.ieee.cz/mtt/soutez07/Pokorny.pdf>

Termín zadání: 12.10.2009

Termín odevzdání: 21.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

prof. Ing. Jiří Jan, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Hlavním cílem této studie je seznámit se s teorií elektromagnetického pole a vytvořit modelovou studii šíření velmi krátkých vln v biologických tkáních. Dalším bodem této práce je zjistit velikost měrného absorbovaného výkonu (SAR) využitím platné hygienické normy.

Konkrétní modelové řešení bylo realizováno v modelovém prostředí programu Comsol Multiphysics 3.5. V tomto modelovém prostředí se podařilo vymodelovat lidskou hlavu a mobilní telefon s interní anténou. Na základě zadání patřičných parametrů bylo výsledkem znázornění rozložení intenzity elektrického pole a následný výpočet přijatého měrného absorbovaného výkonu. Tato hodnota byla následně porovnána s hodnotou, kterou udává platná hygienická norma, tak aby nedošlo k jejímu překročení. Nakonec byly určeny teplotní změny v biologických tkáních způsobené elektromagnetickým vlněním pro interval šesti minut specifikovaný platnou hygienickou normou.

Klíčová slova

Elektromagnetické pole, elektromagnetické vlnění, Maxwellovy rovnice, planární anténa, disperze vln, měrný absorbovaný výkon, Comsol Multiphysics.

Abstract

The main objective of this study is to learn about the theory of electromagnetic field and to create a model of propagation of ultra short waves in a biological tissue. Next point of this paper is to determine a specific absorption rate (SAR) using a valid sanitary standard.

A particular model solution was realized in a model environment of the program Comsol Multiphysics 3.5. A human head and a cellular phone with an intern antenna were successfully created in this model environment. First of all were entered appropriate parameters which led to a successful representation of the distribution of electric field intensity. A value of specific absorption rate taken by a biological tissue was determined in the next step. This value was compared to the value listed in a valid sanitary standard to prevent its overrun. A development of a temperature in a biological tissue was determined as well, according to a six minutes long interval stated in a valid sanitary standard.

Keywords

Electromagnetic field, electromagnetic waves, Maxwell's equations, planar antenna, wave dispersion, specific absorption rate, Comsol Multiphysics.

Bibliografická citace dle ČSN ISO 690

BEREZNANIN, M. *Mapování elektromagnetických polí v biologických tkáních*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 55 s., 4 příl. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

P r o h l á š e n í

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma "Mapování elektromagnetických polí v biologických tkáních" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne 20. května 2010

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Rozmanovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 20. května 2010

.....

podpis autora

Obsah

1. Úvod do problematiky	8
2. Poznatky z teorie elektromagnetického pole.....	9
2.1 Maxwellovy rovnice	9
2.2 Řešení Maxwellových rovnic.....	10
2.3 Rovinné vlny harmonické v dielektriku	11
2.4 Disperze vln	12
2.5 Pole kmitajícího dipólu	12
2.6 Odraz a lom vlnění na rozhraní	14
2.7 Odraz a lom mezi dvěma dielektriky	16
3. Hygienická norma.....	17
3.1 Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením.....	17
3.2 Nejvyšší přípustné hodnoty	18
3.3 Měrný absorbovaný výkon (SAR)	19
3.4 Fyziologické účinky elektromagnetických polí	20
4. Antény mobilních telefonů	22
4.1 Rozdělení jednotlivých typů antén.....	22
4.2 Vyzařovací diagramy jednotlivých apertur	22
4.3 Planární antény.....	24
4.4 Parametry antén mobilních telefonů	30
5. Programové prostředí	32
5.1 Program COMSOL Multiphysics™ 3.5.....	32
5.2 RF modul	34
5.3 Konkrétní modelové řešení	35
5.4 Návrh modelu.....	35
5.5 Nastavení parametrů modelu	38
5.6 Výpočet hodnoty SAR	39
5.7 Grafické řešení - SAR	39
5.8 Grafické řešení - teplotní změny tkáně	45
5.9 Zhodnocení dosažených výsledků.....	49
6. Závěr	50
Literatura.....	52
Seznam obrázků a tabulek	53
Seznam příloh	55
Příloha 1 - m - file pro stanovení průměrné hodnoty SAR - 835 MHz	8
Příloha 2 - m - file pro stanovení průměrné hodnoty SAR - 1900 MHz	10
Příloha 3 - m - file pro stanovení průměrné teplotní změny - 835 MHz	12
Příloha 4 - m - file pro stanovení průměrné teplotní změny - 1900 MHz	13

1. Úvod do problematiky

Na začátku 21. století narůstá nevídaně počet umělých zdrojů elektromagnetického pole v souvislosti s bouřlivým rozvojem informačních bezdrátových technologií. Dnes se dokonce hovoří o "bezdrátové revoluci", která činí náš život pohodlnější, ale má i svá negativa. V konečném důsledku je každý vystaven expozici elektromagnetickému poli jak doma, tak i v zaměstnání. A to stejnosměrným elektrickým a magnetickým polem, střídavým nízkofrekvenčním elektrickým a magnetickým polem a vysokofrekvenčním polem. Posledním jmenovaným se bude tato práce podrobněji zabývat.

Tato studie bude pojednávat o zásadních poznatcích z teorie elektromagnetického pole. Tyto informace nám pomohou k lepšímu porozumění problematiky. Dále zde bude rozebrána hygienická norma vztahující se k ochraně před neionizujícím zářením společně s jeho účinky na lidský organismus. Bude také zapotřebí prostudovat problematiku vyzařování antén, jejich vyzařovacích diagramů a to především ve frekvenčním rozsahu 0,9 - 1,8 GHz (pracovní frekvence mobilních telefonů). Všechny tyto informace budou využity v konkrétním případě, v modelovém prostředí. Modelová studie bude také dalším bodem této práce. Zde bude hlavním úkolem zjistit experimentální cestou jaký dopad má toto vlnění na lidskou tkáň.

2. Poznatky z teorie elektromagnetického pole

V této části budou probrány Maxwellovy rovnice a jejich řešení. Dále bude následovat popis chování rovinných harmonických vln v dielektriku a pole kmitajícího dipólu. Nakonec tato kapitola objasní problematiku disperzí vln, odrazu a lomu vlnění a to jak na rozhraní, tak mezi dvěma dielektriky.

2.1 Maxwellovy rovnice

Existují čtyři Maxwellovy rovnice, jejichž popis bude uveden v diferenciální i integrální podobě.

a) Diferenciální tvar

Pro pole stacionární (časově neproměnné) platí:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = J_0 \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = 0 \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \bar{D} = \rho_0 \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0 \quad (4)$$

Pro pole nestacionární (obecné, časově proměnné) platí:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = J_0 + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\operatorname{div} \bar{D} = \rho_0 \quad (7)$$

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0 \quad (8)$$

kde: J_0 ... hustota elektrického proudu [A/m^2]

ρ_0 ... hustota elektrického náboje [C/m^3]

E ... intenzita elektrického pole [V/m]

B ... magnetická indukce [T]

D ... elektrická indukce [C/m^2]

H ... intenzita magnetického pole [A/m]

b) Integrální tvar, [1]

$$\oint_C \vec{H} d\vec{l} = \sum I + \frac{d\psi}{dt} \quad (9)$$

$$\oint_C \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (10)$$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum Q \quad (11)$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (12)$$

kde: $\sum I$... celkový indukční nebo konvekční proud, tedy volných nábojů
procházejících křivkou C [A]

$\sum Q$... celkový volný náboj obsažený v objemu obaleném plochou S [C]

ψ ... tok intenzity elektrického pole [C]

Φ ... magnetický (indukční) tok [Wb]

2.2 Řešení Maxwellových rovnic

Řešení Maxwellových rovnic vede jednak ke zobecněným vlnovým rovnicím, stejně tak ke zobecněným vlnovým rovnicím nehomogenním.

a) Zobecněné vlnové rovnice, [1]:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (14)$$

b) Nehomogenní zobecněné vlnové rovnice, [1]:

V tomto případě existuje \bar{J}_{vn} - například proud v anténě.

$$\nabla^2 \bar{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = \mu \frac{\partial \bar{J}_{vn}}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon} \text{grad} \rho_{vn} \quad (15)$$

$$\nabla^2 \bar{B} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{B}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = -\mu \text{rot} \bar{J}_{vn} \quad (16)$$

kde: ϵ ... permitivita [F/m]

μ ... permeabilita [H/m]

γ ... konduktivita [S/m]

2.3 Rovinné vlny harmonické v dielektriku

Pokud se přepíše rovnice (13) do fázorového tvaru, tak bude její tvar následující, [1]:

$$\frac{d^2 \bar{E}}{dz^2} + k^2 \bar{E} = 0 \quad (17)$$

kde: $k = \alpha - j\beta$... konstanta šíření

Pro dielektrikum platí $\gamma = 0$. Dosazením lze získat konstantu šíření k , která je kladná a reálná. Řešením rovnice (17) je tedy harmonická vlna postupující kladným směrem z , která má tvar rotujícího fázoru, [1]:

$$\bar{E} e^{j\omega t} = \bar{C} e^{j(\omega t - \alpha z)} \quad (18)$$

Vzhledem k tomu, že pravá strana rovnice (18) neobsahuje složku β (měrný útlum), tak je možno konstatovat, že se jedná o vlnu netlumenou. Složka α (fázová konstanta) určuje spolu s ω fázovou rychlost. Složky \bar{E} a \bar{H} jsou ve fázi.

Charakteristická impedance, [1]:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (19)$$

Poznámka: Oproti vodivému prostředí, v prostředí nevodivém Z nezávisí na kmitočtu a je reálná.

2.4 Disperze vln

Je dán signál, který je složen z většího počtu harmonických složek různého kmitočtu. Jejich průběh je dán útlumem a fázovou rychlostí (β a α).

Pro útlum platí:

- pro $\omega = 0$ je $\beta = 0$ - pro nízké kmitočty dochází k malému tlumení
- pro $\omega \rightarrow \infty$ je $\beta = \infty$ - pro vysoké kmitočty dochází k velkému tlumení

Pro fázovou rychlost platí:

- pro $\omega = 0$ je $v_f = 0$
- pro $\omega \rightarrow \infty$ je $v_f \rightarrow v_{f_0} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ - jedná se o maximální hodnotu fázové rychlosti

Poznámka: Při zvětšující se vodivosti se zvětšuje β a snižuje v_f .

Signál složený z monochromatických vln různých kmitočtů se při průchodu vodivým prostředím tvarově mění, zkresluje (= disperze vln). Při kmitočtech blízkých viditelnému nebo infračervenému záření dochází k disperzi i v prostředí nevodivém.

Skupinová rychlost:

Skupinová rychlost vzniká součtem více vln. Má význam míry rychlosti signálu. V nedisperzním prostředí je totožná s fázovou rychlostí, v prostředí vodivém je vyšší než rychlost fázová. Je vždy menší než $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

2.5 Pole kmitajícího dipólu

Zde bude uveden popis pole kmitajícího dipólu. Nejprve se bude jednat o elektrický dipól, posléze o dipól magnetický.

a) Kmitající elektrický dipól

Magnetický vektor, [1]:

$$\overline{H} = \frac{e}{4\pi} \left(\frac{j\alpha}{r^2} - \frac{\alpha^2}{r} \right) e^{-j\alpha r} \overline{p} \times \overline{r_0} \quad (20)$$

První člen je závislý na $\frac{1}{r^2}$... opožděné magnetostatické pole neboli pole blízké

Druhý člen je závislý na $\frac{1}{r}$... vzniká důsledkem veličiny, jedná se o pole zářivé

Složky pole \overline{E} , [1]:

$$E_r = \frac{p \cos \delta}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{j\alpha}{r^2} \right) e^{-j\alpha r} \quad (21)$$

$$E_\delta = \frac{p \sin \delta}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{j\alpha}{r^2} - \frac{\alpha^2}{r} \right) e^{-j\alpha r} \quad (22)$$

$\frac{1}{r^3}$... má význam opožděného statického pole, $\frac{1}{r^2}$... indukční(víry), $\frac{1}{r}$... zářivá část

Celkový vyzařovaný výkon, [1]:

$$P = \oint_S N_{rs} dS = \frac{\pi}{3} Z \left(\frac{aI_m}{\lambda} \right)^2 = 80\pi^2 \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 I_{ef}^2 \quad (23)$$

kde: N_{rs} ... přenos energie v radiálním směru

b) Kmitající magnetický dipól

Vektor pole \overline{E} , [1]:

$$\overline{E} = -\frac{j\omega\mu_0 e^{-j\alpha r}}{4\pi} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{j\alpha}{r} \right) \overline{m} \times \overline{r_0} \quad (24)$$

Složky pole \overline{H} , [1]:

$$H_r = \frac{m \cos \delta}{2\pi} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{j\alpha}{r^2} \right) e^{-j\alpha r} \quad (25)$$

$$H_\delta = \frac{m \sin \delta}{4\pi} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{j\alpha}{r^2} - \frac{\alpha^2}{r} \right) e^{-j\alpha r} \quad (26)$$

Celkový vyzařovaný činný výkon, [1]:

$$P = \oint_S N_{rs} dS = Z \frac{\pi}{6} I_{ef}^2 \left(\frac{2\pi r_1}{\lambda} \right)^4 = R_Z I_{ef}^2 \quad (27)$$

2.6 Odraz a lom vlnění na rozhraní

Tato část se bude zabývat odrazem a lomem vlnění na rozhraní. V prvním případě půjde o situaci, kdy je vektor \overline{E}_0 kolmý k rovině dopadu. V případě druhém se bude jednat o vektor \overline{E}_0 , který bude rovnoběžný s rovinou dopadu.

Úhly odrazu a lomu

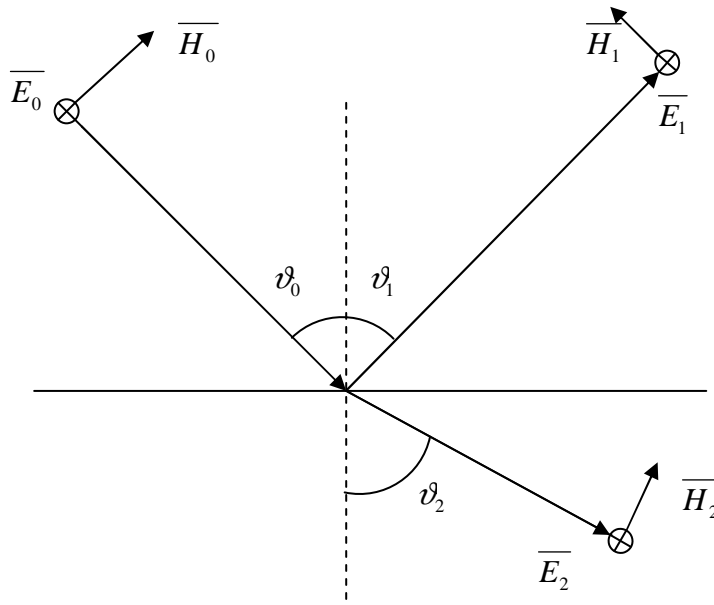
Odražená vlna: $\sin \vartheta_0 = \sin \vartheta_1 \quad (28)$

Postupující vlna: $k_1 \sin \vartheta_1 = k_2 \sin \vartheta_2 \quad (29)$

Snellův zákon: $\frac{\sin \vartheta_2}{\sin \vartheta_1} = \frac{k_1}{k_2} = \frac{\mu_1 Z_2}{\mu_2 Z_1} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (30)$

Amplitudy vektorů

a) Vektor \overline{E}_0 je kolmý k rovině dopadu a rovnoběžný s rovinou rozhraní:

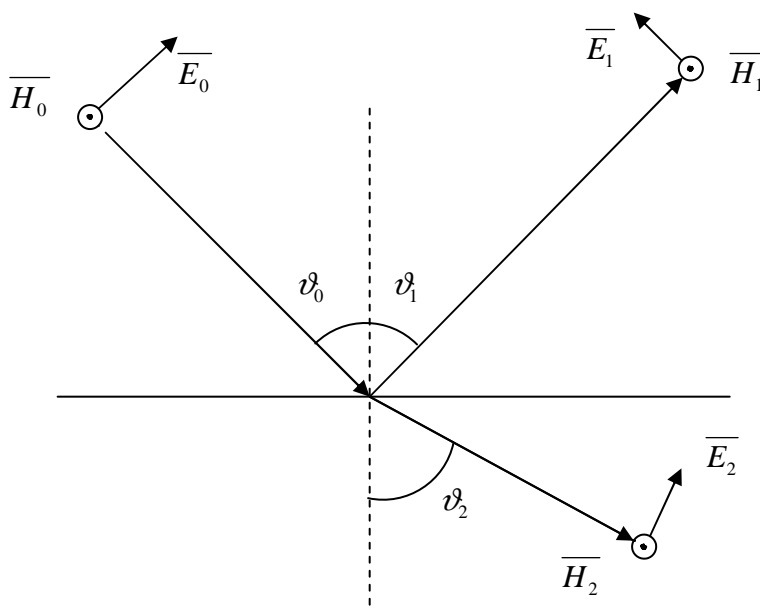


Obrázek č. 1: Odraz a lom vlnění - Vektor \overline{E}_0 kolmý k rovině dopadu.

Fresnelovy rovnice, [1]:
$$\overline{E_1} = \frac{Z_2 \cos \vartheta_1 - Z_1 \cos \vartheta_2}{Z_2 \cos \vartheta_1 + Z_1 \cos \vartheta_2} \overline{E_0} \quad (31)$$

$$\overline{E_2} = \frac{2Z_2 \cos \vartheta_1}{Z_2 \cos \vartheta_1 + Z_1 \cos \vartheta_2} \overline{E_0} \quad (32)$$

b) Vektor $\overline{E_0}$ je rovnoběžný s rovinou dopadu:



Obrázek č. 2: Odraz a lom vlnění - Vektor $\overline{E_0}$ rovnoběžný s rovinou dopadu.

Fresnelovy rovnice, [1]:
$$\overline{H_1} = \frac{Z_1 \cos \vartheta_1 - Z_2 \cos \vartheta_2}{Z_1 \cos \vartheta_1 + Z_2 \cos \vartheta_2} \overline{H_0} \quad (33)$$

$$\overline{H_2} = \frac{2Z_1 \cos \vartheta_1}{Z_1 \cos \vartheta_1 + Z_2 \cos \vartheta_2} \overline{H_0} \quad (34)$$

2.7 Odraz a lom mezi dvěma dielektriky

Zde bude cílem popsat lom mezi dvěma dielektriky a to opět pro dva případy. Nejprve pro vektor \overline{E}_0 kolmý k rovině dopadu. Poté bude následovat situace, kdy bude vektor \overline{E}_0 rovnoběžný s rovinou dopadu.

a)Vektor \overline{E}_0 je kolmý k rovině dopadu, [1]:

$$\overline{E}_1 = \frac{\sin(\vartheta_2 - \vartheta_1)}{\sin(\vartheta_2 + \vartheta_1)} \overline{E}_0 \quad (35)$$

$$\overline{E}_2 = \frac{2 \cos \vartheta_1 \sin \vartheta_2}{\sin(\vartheta_2 + \vartheta_1)} \overline{E}_0 \quad (36)$$

b)Vektor \overline{E}_0 je rovnoběžný s rovinou dopadu, [1]:

$$\overline{H}_1 = \frac{\sin \vartheta_1 \cos \vartheta_1 - \sin \vartheta_2 \cos \vartheta_2}{\sin \vartheta_1 \cos \vartheta_1 + \sin \vartheta_2 \cos \vartheta_2} \overline{H}_0 \quad (37)$$

$$\overline{H}_2 = \frac{2 \sin \vartheta_1 \cos \vartheta_1}{\sin \vartheta_1 \cos \vartheta_1 + \sin \vartheta_2 \cos \vartheta_2} \overline{H}_0 \quad (38)$$

Koeficienty mezi fázory jsou reálné, tudíž odražená i pronikající vlna jsou ve fázi s vlnou dopadající.

Podmínka pro úplný odraz, [1]: $\sin \vartheta_2 = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \sin \vartheta_1 > 1$ (39)

3. Hygienická norma

Cílem této kapitoly je blíže se seznámit s nařízením vlády č. 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením a s ním spojenými nejvyššími přípustnými hodnotami SAR (Specific absorption rate). Dále zjistit, jak spočítat hodnotu SAR pro konkrétní případ. Nakonec budou popsány fyziologické účinky elektromagnetických polí na biologické tkáně.

3.1 Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením

Podmínky ochrany zdraví osob

Expozice osob elektrickým nebo magnetickým polím a elektromagnetickým zářením s frekvencí od hodnoty 0 Hz do hodnoty $3 \cdot 10^{11}\text{ Hz}$ musí být omezena tak, aby:

- a) proudová hustota indukovaná v těle (dále jen "proudová hustota")
- b) měrný v těle absorbovaný výkon, případně měrná v těle absorbovaná energie
- c) hustota zářivého toku elektromagnetické vlny s frekvencí vyšší než 10^{10} Hz dopadající na tělo nebo na jeho část nepřekročily nejvyšší přípustné hodnoty.

Pro účely tohoto nařízení se rozumí:

- a) neionizujícím zářením elektromagnetické záření, které není schopno ionizovat atomy a molekuly, a elektrická a magnetická pole,
- b) expozicí jakákoli situace, kdy je osoba vystavena elektrickému nebo magnetickému poli, poli elektromagnetické vlny nebo elektrickému proudu,
- c) nejvyššími přípustnými hodnotami hodnoty veličin, které bezprostředně souvisejí s biologickými efekty a vznikají při expozici osob,
- d) referenční úrovní hodnoty přímo měřitelných veličin, pomocí nichž se zjišťuje, zda u osoby vystavené expozici nemohou být překročeny nejvyšší přípustné hodnoty, [4].

3.2 Nejvyšší přípustné hodnoty

Nejvyšší přípustné hodnoty měrného absorbovaného výkonu (SAR) jsou stanoveny v Tabulce č. 1. Tyto nejvyšší přípustné hodnoty se vztahují na celkovou absorpci všech přítomných složek elektromagnetického pole v tkáních těla v intervalu frekvencí od hodnoty 100 kHz do hodnoty 10 GHz.

Tabulka č. 1: Nejvyšší přípustné hodnoty měrného absorbovaného výkonu, [4]

Měrný absorbovaný výkon (SAR) - Nejvyšší přípustné hodnoty			
Platí pro frekvence od 10^5 Hz do 10^{10} Hz	Měrný absorbovaný výkon - SAR - středovaný pro kterýkoliv šestiminutový interval a celé tělo	SAR středovaný pro kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 g* tkáně s výjimkou rukou, zápěstí, chodidel a kotníků	SAR středovaný pro kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 g* tkáně rukou, zápěstí, chodidel a kotníků
Zaměstnanci	0,4 W/kg	10 W/kg	20 W/kg
Ostatní osoby	0,08 W/kg	2 W/kg	4 W/kg

* Těchto 10 g je třeba volit ve tvaru krychle, nikoli jako plochý útvar na povrchu těla.

** Platí pro pulsy kratší než 30 μs při frekvenci 300 MHz až 10 GHz

Doba středování pro měrný absorbovaný výkon je šest minut. Při krátkodobé expozici (kratší než šest minut) není tedy nejvyšší přípustná hodnota měrného absorbovaného výkonu překročena, je-li pro zaměstnance splněna nerovnost, [4]

$$\sum_i (SAR_i \cdot t_i) \leq 2,4 \text{ W} \cdot \text{min} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (40)$$

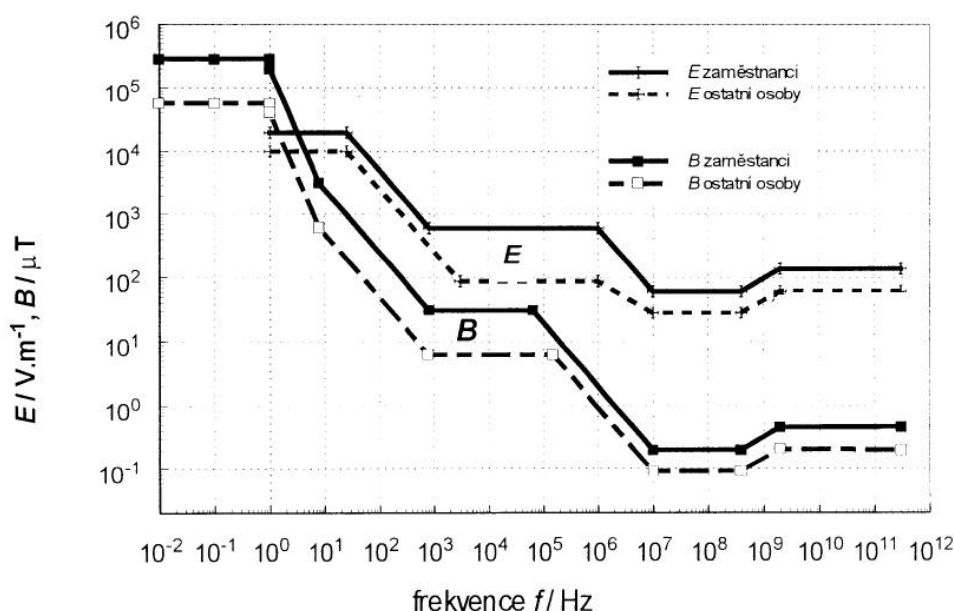
a pro ostatní osoby nerovnost, [4]

$$\sum_i (SAR_i \cdot t_i) \leq 0,48 \text{ W} \cdot \text{min} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (41)$$

SAR_i je měrný absorbovaný výkon při i-té expozici ve $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$ a t_i je doba trvání i-té expozice v minutách.

K určení tepelného působení zdrojů s různými frekvencemi, které se uplatňuje při frekvencích vyšších než 100 kHz , je nutné vypočítat celkový měrný absorbovaný výkon sečtením příspěvků SAR_i od zdrojů s frekvencemi z intervalu od 100 kHz do 10 GHz a celkovou hustotu zářivého toku sečtením příspěvků S_j od zdrojů s frekvencemi z intervalu od $f > 10 \text{ GHz}$ do 300 GHz . Nejvyšší přípustná hodnota není překročena, je-li součet poměru celkového měrného absorbovaného výkonu k jeho nejvyšší přípustné hodnotě SAR_L a poměru celkové hustoty zářivého toku k její nejvyšší přípustné hodnotě S_L menší než jedna nebo roven jedné, [4]:

$$\sum_{100 \text{ kHz}}^{10 \text{ GHz}} SAR_i / SAR_L + \sum_{f > 10 \text{ GHz}}^{300 \text{ GHz}} S_j / S_L \leq 1 \quad (42)$$



Obrázek č. 3: Referenční úrovně - Elektrické pole E a magnetická indukce B , [4]

3.3 Měrný absorbovaný výkon (SAR)

Jedná se o časovou derivaci podílu diferenciálního množství energie dW a diferenciálního množství látky dm obsažené v objemovém elementu dV s hustotou látky ρ , [4]:

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho} \frac{dW}{dV} \right) \quad (43)$$

Měrný absorbovaný výkon (SAR) je možné vyčíslit podle těchto rovnocenných vzorců, [4]:

$$SAR = \frac{\sigma E_i^2}{\rho} \quad (44)$$

$$SAR = c_i \frac{dT}{dt} \quad (45)$$

$$SAR = \frac{J^2}{\rho \sigma} \quad (46)$$

Jednotlivé symboly označují:

E_i ... intenzitu elektrického pole uvnitř tělesné tkáně [V/m]

σ ... elektrickou vodivost tkáně těla [S/m]

c_i ... měrnou tepelnou kapacitu tělesné tkáně [J/(kg.°C)]

$\frac{dT}{dt}$... časovou derivaci teploty v tělesné tkáni [°C/s]

J ... indukovanou proudovou hustotu v tělesné tkáni [A/m²]

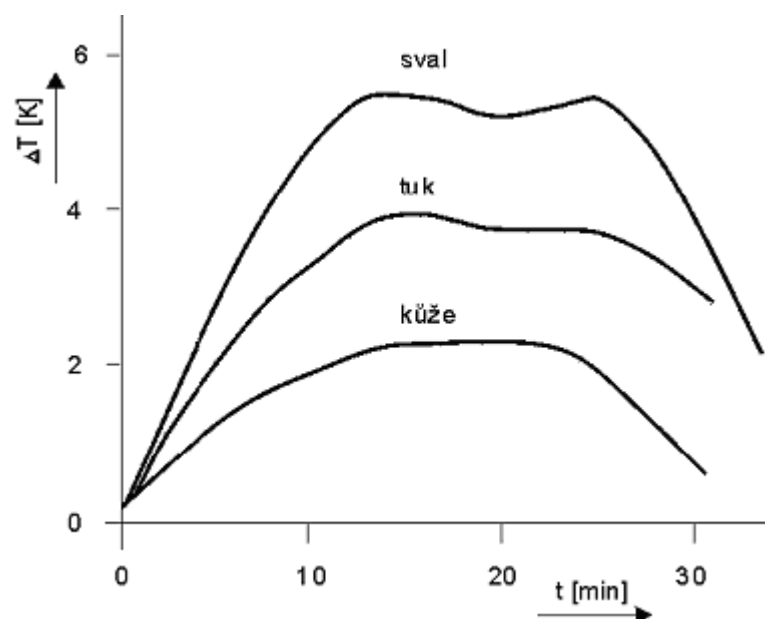
SAR ... měrný absorbovaný výkon [W/kg]

SA ... měrná absorbovaná energie [J/kg]

3.4 Fyziologické účinky elektromagnetických polí

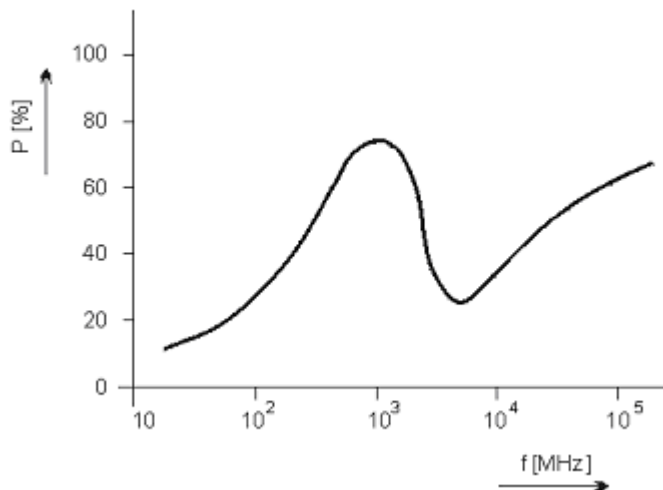
Tepelné účinky

Tepelné účinky elektromagnetických polí, které se projevují objektivně indikovatelným zvýšením teploty ozařovaných tkání, jsou závislé na velikosti pohlcené energie a na hloubce, ve které se záření absorbuje. Čím vyšší je užitá pracovní frekvence, tím menší je hloubka vniku vlnění do tkání organismu. Výsledný tepelný efekt je závislý na rozměrech a tvaru biologických struktur, na možnostech jejich ochlazování protékající krví či odvodu tepla z povrchu těla (evaporací). Zásadní význam zde proto má termoregulační mechanismus organismu. Průběh změn teploty typických tkání při ozáření elektromagnetickým polem dokumentující adaptační schopnost organismu je uveden na Obrázku č. 4, [2].



Obrázek č. 4: Oteplení tkání v závislosti na expozici.

Při celotělových modelových studiích respektujících konstituční parametry jedinců byla zjištěna závislost absorbovaného výkonu na frekvenci. Tato závislost je uvedena na Obrázku č. 5, [2].



Obrázek č. 5: Frekvenční závislost absorbovaného výkonu.

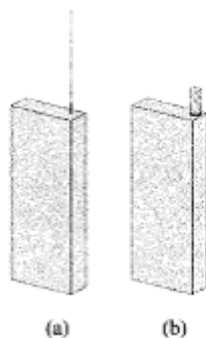
Z Obrázku č. 5 je patrné, že k největší absorpci výkonu tedy dochází na frekvencích blízkých frekvenci 10^3 MHz.

4. Antény mobilních telefonů

Úkolem této části bude seznámit se se základními parametry antén mobilních telefonů. Tyto informace budou následně využity v modelové studii. Nakonec budou uvedeny vyzařovací diagramy různých typů antén.

4.1 Rozdělení jednotlivých typů antén

Antény mobilních telefonů prošly určitým vývojem, co se týče jednotlivých typů. Ze začátku se vyráběly antény dipólové. Po těchto se přešlo ke čtvrtvlnným aperturám. Ty nakonec vystřídaly antény ve tvaru šroubovice, které se používají dodnes. V případě interních antén mobilních telefonů se využívá mikropáskové technologie, kterou se bude tato studie také zabývat.



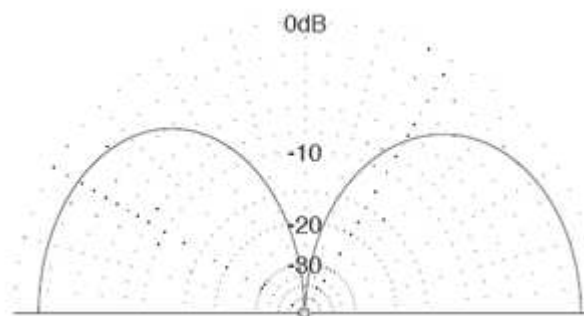
Obrázek č. 6: Antény mobilních telefonů: a) Čtvrtvlnný monopól, b) Šroubovice.

4.2 Vyzařovací diagramy jednotlivých apertur

V této části budou uvedeny základní tvary vyzařovacích diagramů čtvrtvlnné a šroubovité apertury.

a) Čtvrtvlnná anténa

Jedná se o jednu z nejjednodušších a nejefektivnějších antén. Čtvrtvlnná anténa generuje záření, jehož vlnová délka je dvakrát větší, než je délka antény, [12].



Obrázek č. 7: Vyzařovací diagram čtvrtvlnné antény.

b) Anténa tvaru šroubovice

Spirálovitá anténa se skládá z vodivého drátu stočeného do tvaru šroubovice. Tato apertura může pracovat ve dvou módech: V normálním (broadside) nebo osovém (endfire), [11].

Typ antény	Vyzařovací diagram
<p>Axiální mód</p>	<p>Elevace a azimut</p>
<p>Normální mód</p>	<p>Elevace</p>

Obrázek č. 8: Vyzařovací diagram spirálovité antény.

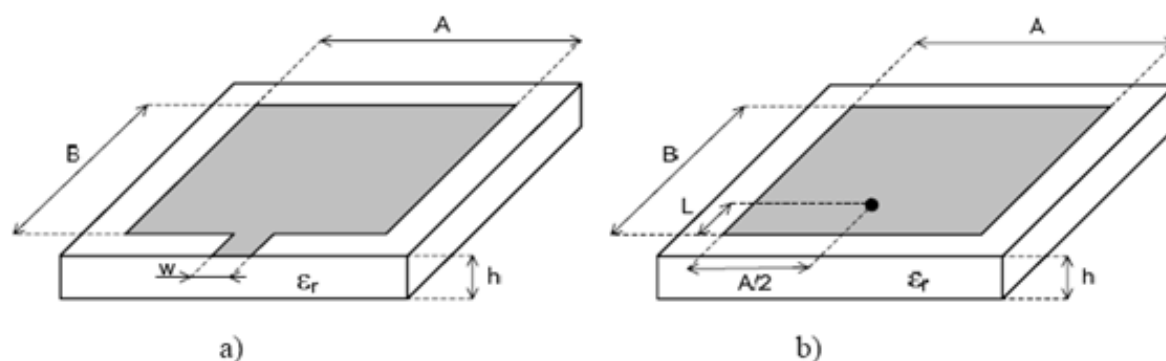
Na Obrázcích č. 7 a 8 vidíme vyzařovací diagramy patřičných apertur, [12], [11].

4.3 Planární antény

Planární (nebo také mikropáskové) antény jsou velice rozšířeným druhem antén díky svým rozměrům. Navíc jsou vyráběny stejnou technologií jako tištěné spoje a tím se jejich výroba stává levnou a s možností integrace do mikrovlnných obvodů. Touto technologií však nelze vyrábět antény pro velké výkony. Další nevýhodou může být jejich úzkopásmovost, což je dáno vysokým činitelem jakosti mikropáskové struktury. Problém může představovat nežádoucí vyzařování napájecího mikropáskového vedení, deformující vyzařovací diagram a snižující účinnost antény.

Vícepásmovými planárními anténami rozumíme takové, které pracují (rezonují) na dvou a více kmitočtech (v kmitočtových pásmech). V následujících kapitolách budou uvedeny nejnámější konstrukce takových antén.

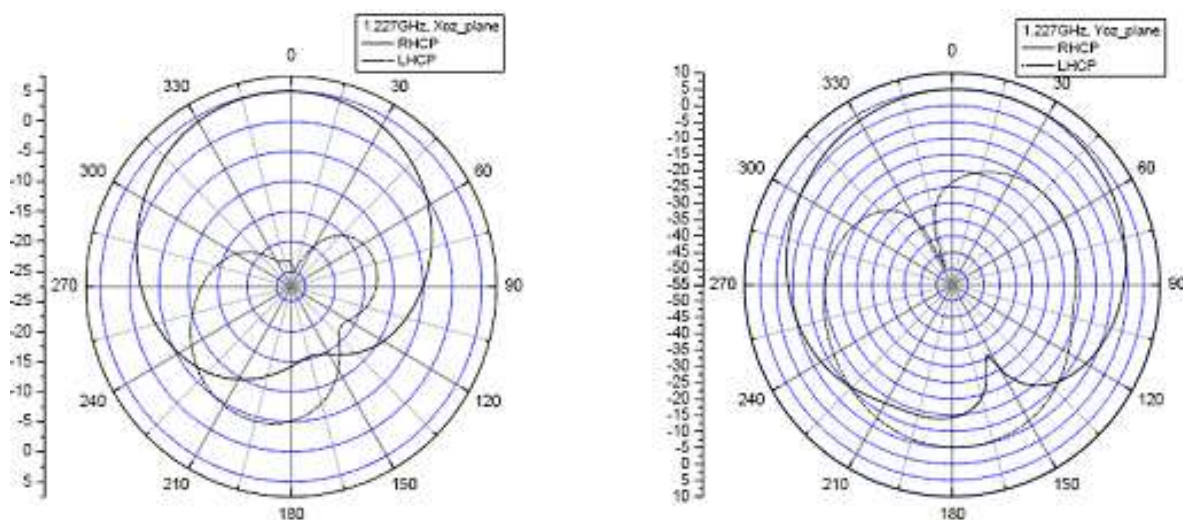
a) Flíčková anténa



Obrázek č. 9: Planární flíčková anténa napájena: a) mikropáskovým vedením, b) koaxiální sondou.

Nejjednodušší a nejčastěji používaná konstrukce planární antény je tzv. „patch antenna“, neboli flíčková anténa viz. Obrázek č. 9. Anténa je tvořena vodivým čtvercem, o stranách A a B s přibližnými rozměry $\lambda/2$, který je nanesený na dielektrickém substrátu tloušťky h o relativní permitivitě ϵ_r s co nejmenšími ztrátami. Druhá strana substrátu je souvisle pokovená a tvoří reflektor. Tato nese nulový potenciál a omezuje vyzařování v daném směru (na Obrázku č. 9 dolů). Anténa bývá napájena mikropáskovým vedením nebo koaxiální sondou. Druhý případ má velkou výhodu ve výrazném potlačení parazitního vyzařování napájecího vedení [13].

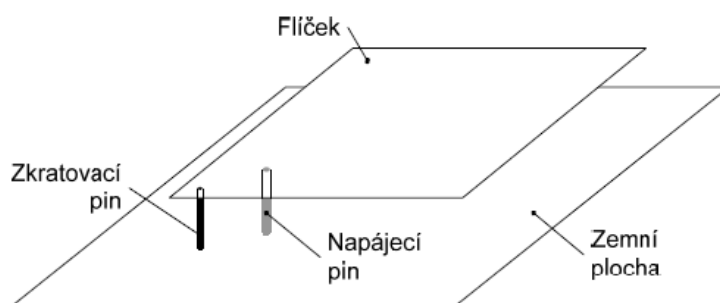
Pro získání potřebných vícepásmových vlastností se do plochy flíčku frézují štěrby např. ve tvaru písmene L nebo U. Tímto postupem můžeme získat více pracovních frekvencí antény [13].



Obrázek č. 10: Vyzařovací diagramy antény pro $f = 1,227 \text{ GHz}$.

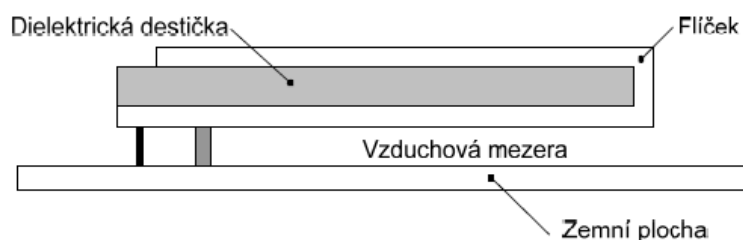
b) Planární anténa typu obrácené F

Také známá pod zkratkou PIFA (Planar Inverted - F Antenna). Skládá se z flíčku, zkratovacího pinu (nebo zkratovací stěny) a napájecího pinu (koaxiální sondy). Flíček je umístěn nad zemní plochou, ve vhodném místě je s ní propojen zkratem a napájen koaxiální sondou. Vzhled konstrukce je uveden na Obrázku č. 11. V bočním pohledu anténa připomíná písmeno F, odtud její název.

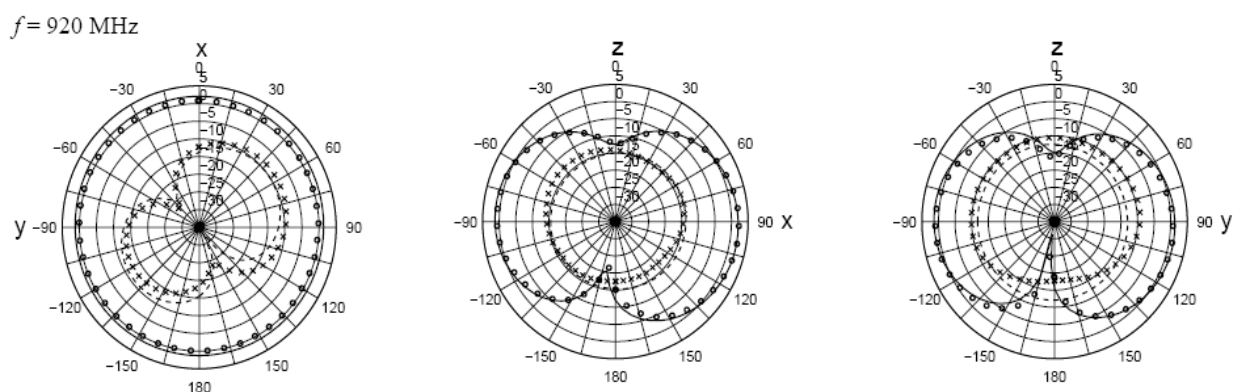


Obrázek č. 11: Prostorové uspořádání konstrukce PIFA.

Flíček bývá nanesen na tenký dielektrický substrát a poté upevněn nad zemní plochu. Anténa se často vyrábí jako skládaná, tedy jakoby z jediného plátu plechu, který po přeložení tvoří oboustranně pokovený flíček viz. Obrázek č. 12. Pro získání potřebných vícepásmových vlastností se do plochy flíčku frézují štěrby ve tvaru např. písmene L nebo U. Tímto postupem můžeme získat více pracovních frekvencí antény [13].



Obrázek č. 12: Prostorové uspořádání konstrukce PIFA se skládaným flíčkem.



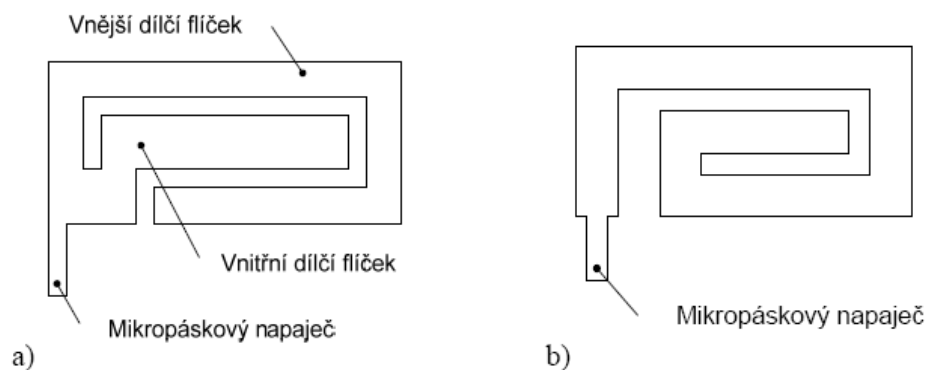
Obrázek č. 13: Vyzařovací diagramy antény pro frekvenci $f = 920 \text{ MHz}$.

c) Nízkoprofilové monopóly

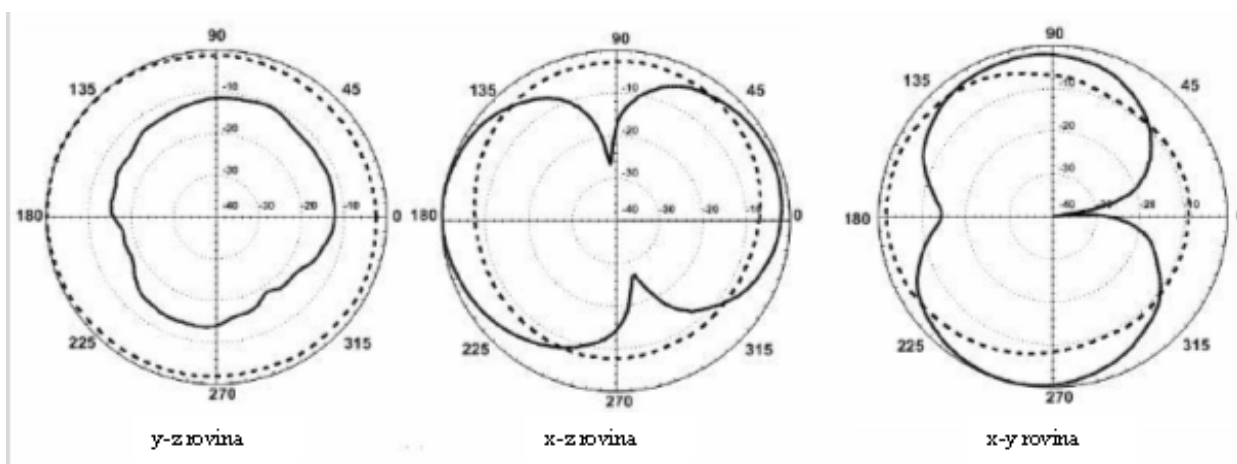
Nízkoprofilové monopóly představují klasický monopól realizovaný jako tenký kovový pásek nanesený na dielektrické podložce. Příklady dvoupásmových konstrukcí jsou uvedeny na Obrázku č. 14 [13].

Všeobecně se vyskytují ve dvou provedeních:

- planární monopóly se zářezy
- planární spirálovité monopóly



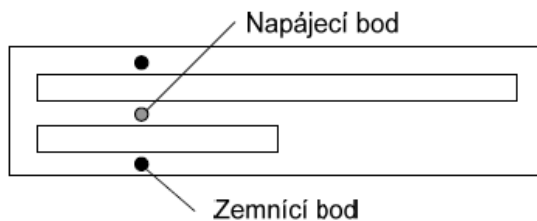
Obrázek č. 14: Dvoupásmové nízkoprofilové planární monopóly: a) se zářezy, b) spirální.



Obrázek č. 15: Vyzařovací diagramy antény pro frekvenci $f = 900 \text{ MHz}$.

d) Štěrbínové antény

Nejjednodušší anténou tohoto typu je protáhlá štěrba, vyříznuta v rozlehlé vodivé desce jak je vidět na Obrázku č. 16. Štěrbina a planární dipól stejného tvaru a rozměru tvoří komplementární dvojici antén [13].



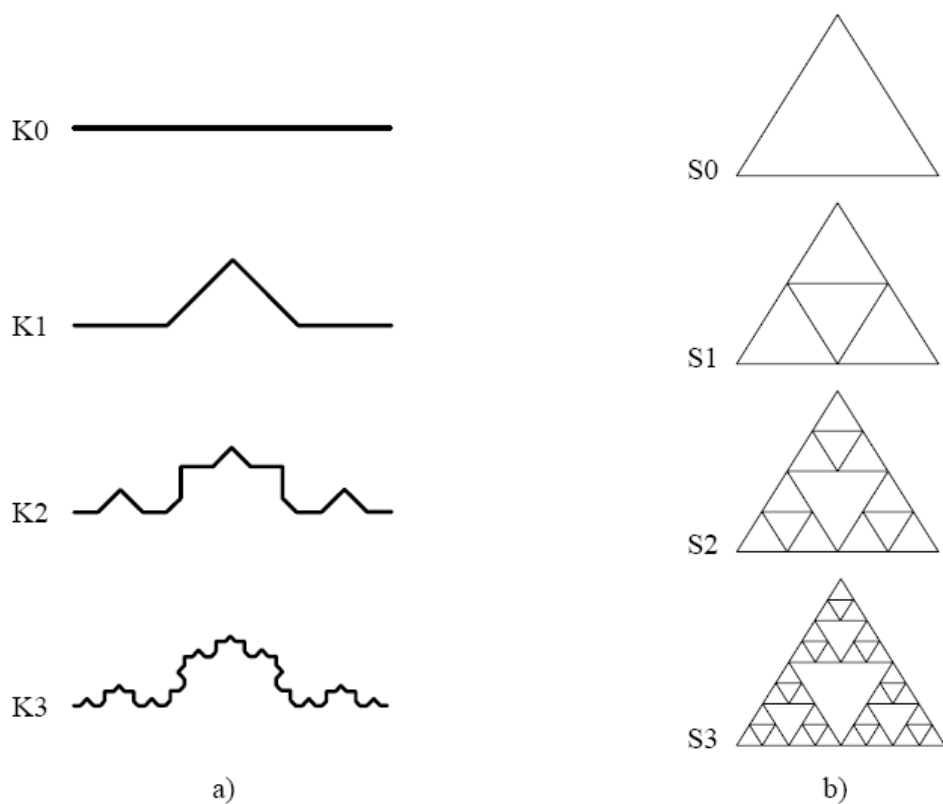
Obrázek č. 16: Dvoupásmová štěrbinová anténa.

e) Fraktální antény

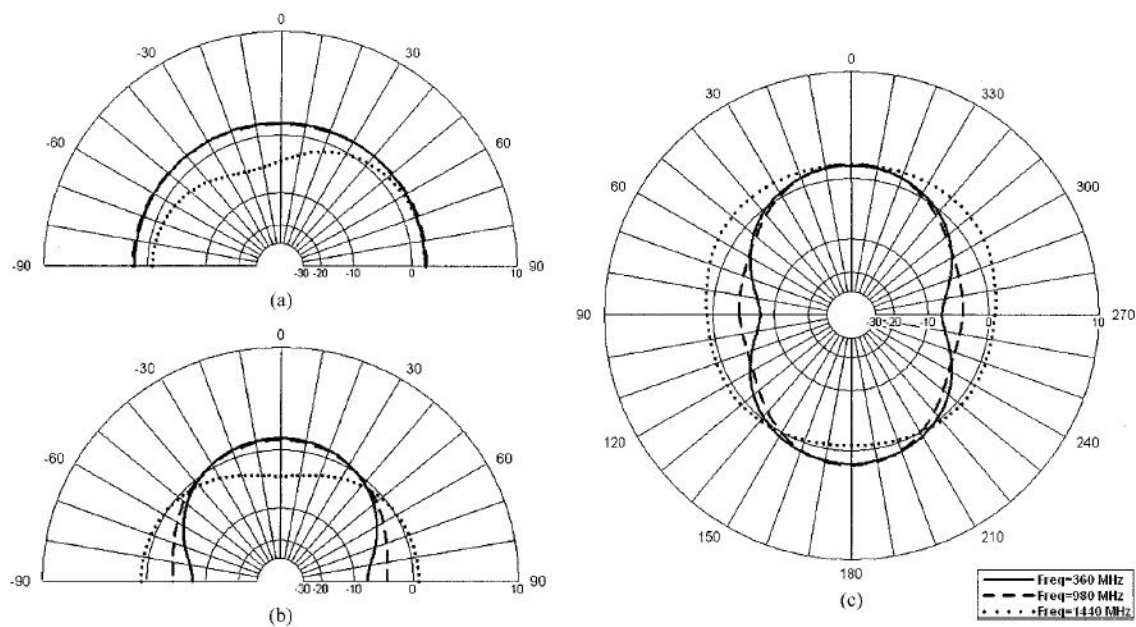
Jedná se o nový přístup ke konstrukci antén, který je výsledkem současného úsilí o spojení geometrie fraktálů s teorií elektromagnetického pole. Pojem „fraktál“, který znamená zlomkový nebo nepravidelný útvar, byl poprvé použit k popisu útvarů, kde jednotlivé části jejich struktury jsou stejné nebo podobné. A tak fraktály jsou s úspěchem používány pro modelování tak složitých přírodních útvarů jako jsou mraky, horské hřebeny, linie pobřeží, sněhové vločky, kapradí, galaxie a mnoho jiných. U fraktálů můžeme různě definovat jejich délku a skládají převážně z kopií sama sebe v různém měřítku. Tyto unikátní vlastnosti fraktálů byly využity k vývoji nové konstrukce antén, které mohou splňovat následující vysoce žádané vlastnosti:

- kompaktní rozměry,
- nízký profil,
- vícepásmovost nebo širokopásmovost.

Typickým příkladem fraktální antény je Kochův a Sierpinského monopol. V případě Kochova monopolu se jedná o křivku, tedy o Kochovu křivku. Algoritmus konstrukce Kochovy křivky, vytvářející anténu, je zřejmý z Obrázku č. 17a). Zde jsou zobrazeny první tři iterace, označené K1 až K3, doplněné o výchozí úsečku K0, odpovídající monopolu. Obvykle je výška h takového monopolu současně také jejím maximálním vnějším rozměrem. Skutečná (elektrická) délka anténního prvku l je ovšem v našem případě funkcí počtu iterací n . Sierpinského monopol je plošný útvar. Algoritmus konstrukce Sierpinského fraktálu, vytvářející plošnou anténu, zřejmý z Obrázek č. 17b). Zde jsou zobrazeny první tři iterace, označené S1 až S3, doplněné o výchozí útvar S0, představující rovnostranný trojúhelník. Podstata rozdílu mezi plošnou anténou Sierpinského a Kochovým monopólem je taková, že u plošné antény je nejnižší rezonanční kmitočet určen její výškou a fraktálové iterace na něj nemají vliv. Naproti tomu anténa ve tvaru fraktálové křivky se s každou iterací prodlouží a vzdor tomu, že její výška h zůstává zachována. Lze tedy očekávat, že díky jejímu fyzikálnímu prodloužení vzroste i její elektrická délka. Souvislosti s tím se přiměřeně sníží i rezonanční kmitočet. Na základě těchto vlastností je Kochův fraktál obvykle používán pro miniaturní antény a Sierpinského fraktál pro vícepásmové antény, [13].



Obrázek č. 17: Postup tvorby: a) Kochovy křivky, b) Sierpinskeho monopólu.



Obrázek č. 18: Vyzařovací diagramy antény pro frekvence $f = 360 \text{ MHz}$, 980 MHz a 1440 MHz .

4.4 Parametry antén mobilních telefonů

Rozsah výkonů těchto antén se pohybuje od 0,25 do 2 W. Frekvenční rozsah spadá do oblasti od 900 MHz - 1,8 GHz.

Tabulka č. 2: Přidělená kmitočtová pásma pro komunikační systémy, [13]

Typ sítě	Kmitočtové pásmo - vysílání	Kmitočtové pásmo - příjem
GSM900	880 MHz - 915 MHz	925 MHz - 960 MHz
GSM1800	1710 MHz - 1785 MHz	1805 MHz - 1880 MHz

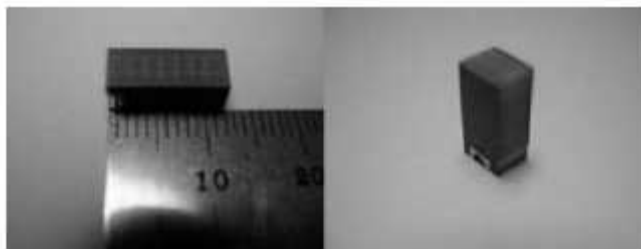
V Tabulce č. 2 jsou zmíněna dvě základní kmitočtová pásma pro komunikační systémy. V prvním typu sítě, který nese název GSM900, pracují komunikační zařízení na frekvenci blízké 900 MHz. Pro typ sítě GSM1800 je tato komunikační frekvence blízká frekvenci 1900 MHz.

Tabulka č. 3: Výpočet intenzity elektromagnetického pole mobilního telefonu

Výpočet intenzity elektromagnetického pole mobilního telefonu E [V/m]						
Vzdálenost od ant.mob.tel pol. r [m]	Výkon mobilního telefonu P [W]					
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00
0,05	54,8	77,5	94,9	109,5	134,2	154,9
0,08	34,2	48,4	59,3	68,5	83,9	96,8
0,10	27,4	38,7	47,4	54,8	67,1	77,5
0,25	11,0	15,5	19,0	21,9	26,8	31,0
0,50	5,5	7,7	9,5	11,0	13,4	15,5
0,75	3,7	5,2	6,3	7,3	8,9	10,3
1,00	2,7	3,9	4,7	5,5	6,7	7,7

V Tabulce č. 3 jsou zaznamenány hodnoty pro výpočet intenzity elektromagnetického pole mobilního telefonu pro různé velikosti výkonů antén z rozsahu 0,25 až 2 W. Výčet těchto hodnot intenzit elektromagnetického pole je dán pro několik vzdáleností od antény mobilního telefonu z rozsahu 0,05 - 1 m.

Co se týče rozměrů, antény mohou být v dnešní době již tak malé, že mohou být zabudovány přímo v mobilním telefonu. Vyrábějí se již antény o velikosti 5,8 mm vysoké a 4 mm široké, [8].



Obrázek č. 19: Chipová anténa - ukázka rozměrů.

Pro modelové řešení bude použita ověřená konstrukce flíčkové antény, která je nejvíce používanou interní anténou v komerčních aplikacích pro mobilní komunikaci. Hlavní důvod je ten, že její rozměry jsou miniaturní, což ji dělá vhodnou pro montáž do mobilních zařízení. Navíc dokáže pracovat s dvojí polarizací a tím umožňuje příjem signálu v libovolné poloze antény, což je důležitý požadavek pro všechny mobilní přijímače. Důležitý rys pro multi - band aplikace je také možnost vícepásmové realizace.

5. Programové prostředí

Hlavním cílem této kapitoly je seznámit se s koncepcí a využitím programu Comsol Multiphysics, blíže poté s jeho radiofrekvenčním modulem, který bude využit pro modelovou studii šíření velmi krátkých vln. Tato kapitola bude dále pojednávat o konkrétním modelovém řešení a nastavení veškerých parametrů jednotlivých objektů (biologických tkání a mobilního telefonu). Nedílnou součástí bude také definice rovnice pro výpočet hodnoty SAR. Tato definice bude využita pro stanovení grafického řešení prostorového rozložení SARu v biologické tkáni a pro stanovení průměrné hodnoty SAR v krychli o váze 10 g, jak udává hygienická norma. Posledním bodem této kapitoly bude grafické řešení teplotně časových změn ve tkáni.

5.1 Program COMSOL Multiphysics™ 3.5

Problematika šíření elektromagnetických vln v biologických tkáních bude řešena za pomoci programu Comsol Multiphysics 3.5. Jedná se o produkt švédské společnosti COMSOL, který umožňuje modelování a simulaci fyzikálních procesů popsaných parciálními diferenciálními rovnicemi s následným řešením metodou konečných prvků. Vedle 32 a 64 - bitových operačních systémů Windows a UNIX může nová verze COMSOL Multiphysics™ 3.5 pracovat pod novým operačním systémem 64 - bit/32 - bit Microsoft Windows Vista a pod platformou Macintosh s procesorem Intel.

Tento program má možnost zahrnout do jednoho řešení několik fyzikálních vlivů současně, například zatěžování silou při současném působení okolní teploty. K dispozici je srozumitelné a intuitivní grafické 2D a 3D prostředí a nejedná se o pouhé nezáživné textové údaje doplňující složité rovnice. I když je toto programové prostředí plné matematiky, může s jeho pomocí úspěšně a rychle řešit úlohy i člověk z praxe, který matematiku špičkově neovládá, ale svému oboru rozumí dobře. Grafické výstupy jsou názorným vodítkem při hledání optimálního řešení zadané úlohy. Comsol Multiphysics 3.5 pracuje společně s Matlabem, využívá jeho pracovní prostor (Workspace) a hlavně grafických funkcí, [6].

Práci v Comsol Multiphysics 3.5 můžeme rozdělit do tří etap:

1. Volba typu úlohy, vytváření geom. modelu úlohy a zadání okrajových podmínek
2. Generování sítě modelu a řešení úlohy
3. Zpracování výsledků řešení, údaje, grafy, animace

Vstupní bránou je takzvaný „Model navigátor“ - dialogové okno, ve kterém se volí pracovní oblast - například přestup tepla, proudění, pružnost a pevnost, elektromagnetismus a tak dále. Tato volba určuje tvar parciálně diferenciálních rovnic, které bude program řešit. Zároveň je tím dán pokyn, aby se v grafickém editoru zobrazovaly dialogy spojené s touto problematikou. Současně se také volí geometrický prostor, ve kterém bude úloha řešena. Může to být 1D, 2D a 3D. Pokud charakter úlohy nesplňuje žádná z už definovaných aplikací, je zde možnost použít všeobecný tvar parciálně diferenciální rovnice a vhodným zadáváním koeficientů do těchto rovnic si vytvořit vlastní aplikaci.

Řešení úlohy:

Podle typu úlohy si program zvolí tzv. „řešič“, jehož parametry je možno dále upravovat. Používají se následující řešiče:

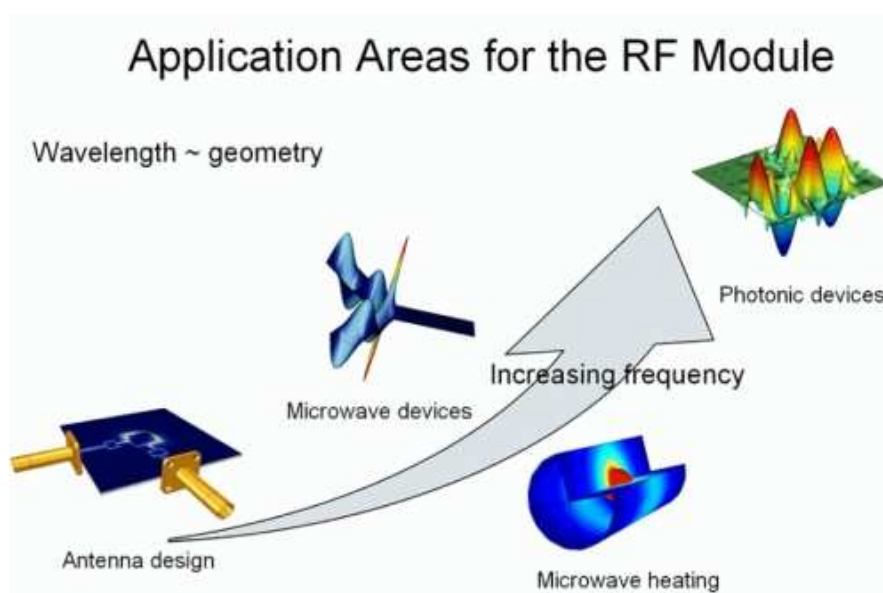
- lineární řešič,
- nelineární řešič,
- řešič na řešení úloh v proměnném čase,
- adaptivní řešič (adaptivní generování sítě se pokouší identifikovat oblasti, ve kterých je potřebná velká přesnost),
- iterační řešič,
- parametrický řešič,
- řešič multigrid, který řeší lineární i nelineární úlohy parciálně diferenciální rovnice ve tvaru koeficientů nebo ve všeobecném tvaru.

Zobrazení simulace:

Proces simulace může být zobrazený v textové, ale i v grafické formě. Textová forma obsahuje hodnoty veličin (reálný čas, účinnost prvku a účinnost systému v procentech, doby reakce), které se zobrazují v jednotlivých oknech. Hodnoty veličin je možno exportovat do údajového souboru, ze kterého se dají údaje použít pro simulaci ve virtuálním prostoru.

5.2 RF modul

Pro řešení úlohy bude využit jeden z modulů zabudovaných v Comsolu. Jedná se o modul RF - radiofrekvenční modul, který umožňuje modelovat mikrovlnná zařízení a součásti z fotoniky a obecně usnadňuje návrh systémů pracujících s elektromagnetickým vlněním a to jak ve 2D, 3D, tak i v osové symetrii. Lze vytvářet prototypy zařízení, které přenášejí, přijímají nebo zpracovávají elektromagnetické vlny ve frekvenčním rozsahu od radiových až po optické vlny. Uživatel má možnost brát v úvahu multifyzikální vlivy zahrnující například interakce mezi přestupem tepla a mechanickým zatížením konstrukce. Je možné zkoumat například vliv tepla na frekvenční odezvu mikrovlnného filtru, lze zkoumat výkonové vlnovody. Modul nabízí připravené multifyzikální aplikace například pro mikrovlnné teplo. Uživatel tak nemusí složitě zkoumat, kterou aplikaci do multifyzikální úlohy zařadit.



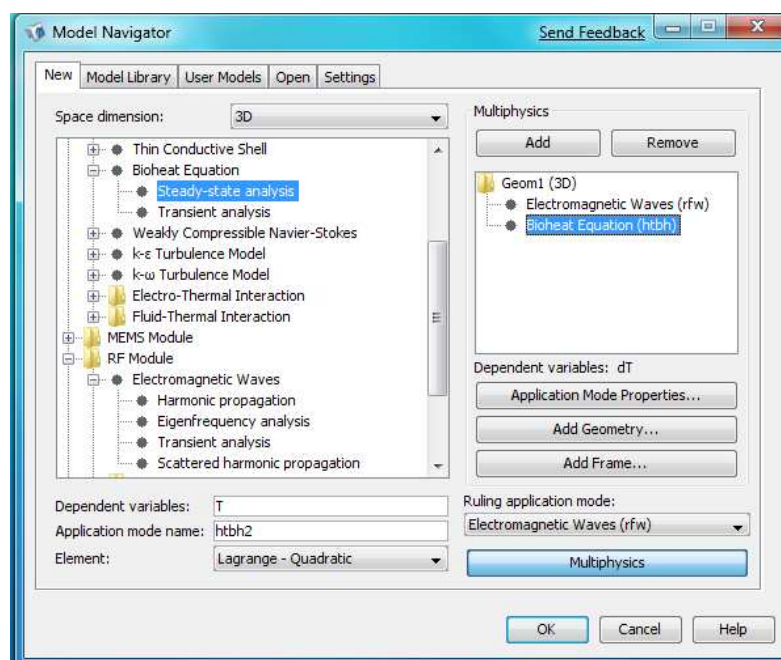
Obrázek č. 20: Oblasti aplikací RF Modulu, [6]

RF modul obsahuje soubor zjednodušení založených na Maxwellových rovnicích, které jsou zjednodušeny pro konkrétní řešené případy, a předdefinované ve spojení s mikrovlnným ohřevem.

V modelovém prostředí je možno nastavit vlastnosti jednotlivých rozhraní objektů, stejně tak i jejich jednotlivé parametry jako je konduktivita či relativní permitivita a permeabilita. Stejně tak je zde možnost nadefinování globální frekvence.

5.3 Konkrétní modelové řešení

V modelovém navigátoru je potřeba zvolit již zmíněný RF Modul, který se pro řešení této úlohy hodí nejlépe. Dále je důležité přidat taktéž Heat Transfer Module - tedy modul, který umožní zkoumat teplotní změny modelu. Problém bude řešen ve 3D zobrazení.



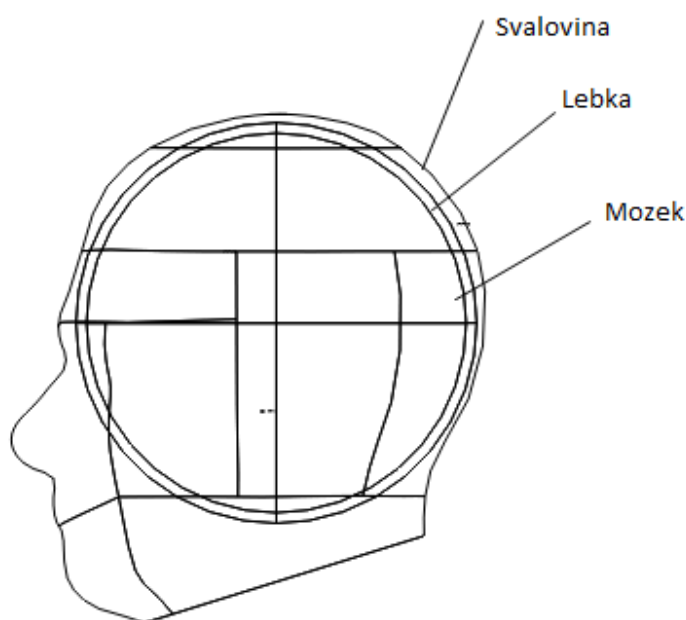
Obrázek č. 21: Výběr modulů

5.4 Návrh modelu

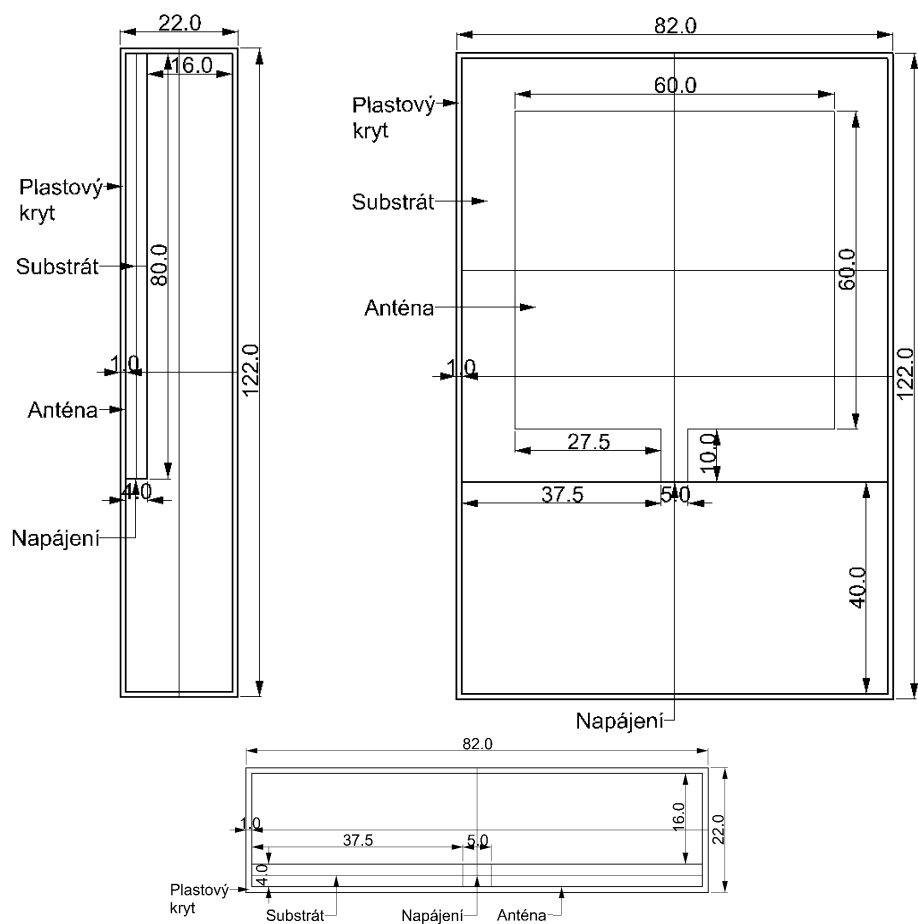
Do modelového prostředí bude vložen 3D model hlavy. Lidská hlava je obecně vrstevnaté nehomogenní dielektrikum. V tomto případě budou pro zjednodušení uvažovány tři vrstvy. Na povrchu to bude vrstva svaloviny lebky, dále lebeční kost a uvnitř mozek. Dovnitř tohoto modelu je potřeba přidat první 3D elipsoid, jehož rozdílem s 3D modelem hlavy, docílíme konstrukci vrstvy svaloviny lebky. Vytvořením dalších dvou elipsoidů a jejich vzájemným rozdílem bude vykonstruována lebeční kost. Vytvořením posledního 3D elipsoidu bude vymodelována vrstva vnitřní - tedy mozek. Tloušťka lebeční kosti a vrstvy svaloviny lebky se pohybuje v rozsahu hodnot 4,4 - 6,6 mm, [14]. Zde je uvažována tloušťka 5 mm pro obě vrstvy. Struktura biologických tkání v lebce člověka byla zvolena po konzultaci s prof. MUDr. Jindřichem Vomelou, CSc., který návrh tohoto modelu schválil.

Dalším krokem bude modelování dvou mobilních telefonů. První bude pracovat na frekvenci 835 MHz a jeho rozměry jsou vidět na Obrázku č. 23, [6]. Druhý aparát bude pracovat na frekvenci 1900 MHz a je vyobrazen na Obrázku č. 24, [20]. Tyto obrázky byly vytvořeny ve zkušební verzi programu Rhinoceros 4.0. Oba mobilní aparáty budou umístěny ve 3D prostoru tak, aby byly ve vzdálenosti 10 mm od povrchu hlavy, [9].

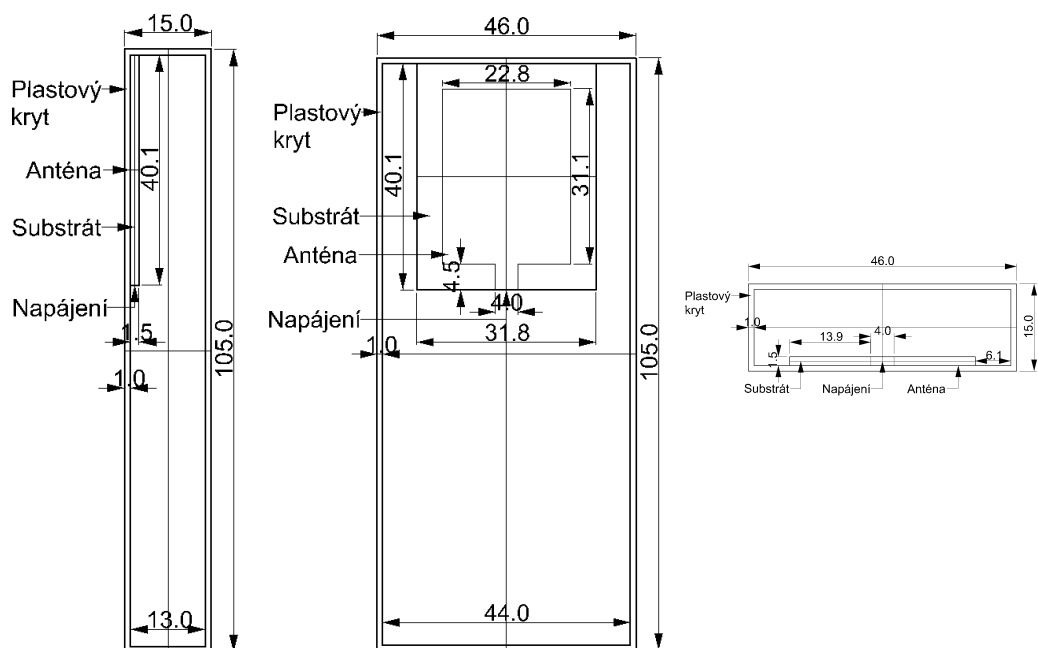
Všechny tyto objekty se budou nacházet v prostředí o permitivitě rovné permitivitě vzduchu. Okrajové podmínky jsou definovány na elektricky nebo magneticky vodivých stěnách, kde je tečná složka elektrické i magnetické intenzity nulová. Pokud není struktura takto vodivě uzavřena, je potřeba zajistit na hranici oblasti, ve které pole počítáme, její bezodrazové zakončení například použitím bezodrazového zakončení dokonale přizpůsobené vrstvy (PML - Perfectly Matched Layer). PML tvoří oblast s absorpčním materiálem, jehož ztráty jsou způsobeny dielektrickým i magnetickým ohřevem. Vhodně navrženou PML je možné zajistit požadovaný útlum signálu díky vzniku dostatečně velkých ztrát ve vrstvě.



Obrázek č. 22: 3D model lidské hlavy.



Obrázek č. 23: Model mobilního telefonu - 835 MHz, pohled zprava, zepředu a shora



Obrázek č. 24: Model mobilního telefonu - 1900 MHz, pohled zprava, zepředu a shora

5.5 Nastavení parametrů modelu

Parametry tkání pro modelové prostředí budou nastaveny podle Tabulky č. 4, [5]. Parametry materiálů, ze kterých je složen mobilní telefon, se poté nacházejí v Tabulce č. 5, [15], [16], [17], [18].

a) Parametry jednotlivých tkání:

Tabulka č. 4: Parametry tkání pro simulaci (pro frekvence 1900 a 835 MHz)

Typ tkáně	Vodivost σ [S/m]		Relativní permitivita ϵ_r [-]		Hustota ρ [kg/m ³]		Specifické oteplení c_s [J/kg.K]		Tepelná vodivost k [W/m.K]	
	835	1900	835	1900	835	1900	835	1900	835	1900
Možek	0.7665	1.2038	45.8055	43.3749	1030		3650		0.5	
Lebeční kost	0.2416	0.4561	16.6208	15.4651	1850		1256		0.5	
Svalovina lebky	0.9692	1.480	55.9555	54.3048	1040		3639		0.5	
Krev	-		-		1000		3639		-	

b) Parametry mobilního telefonu:

Tabulka č. 5: Parametry mobilního telefonu (pro frekvence 1900 a 835 MHz)

Typ	Vodivost σ [S/m]		Relativní permitivita ϵ_r [-]		Další parametry	
	Plast	Substrát	Plast	Substrát	Vstupní napětí V_{in} [V]	Impedance externího kabelu Z_0 [Ω]
835	0		2.4	5.23	54.5	75
1900	0		2.4	5.23	54.5	50

Dále je třeba nastavit globální frekvenci vysílače na hodnotu mobilního telefonu - $nu_{rfw} = 835$ MHz pro první model antény a $nu_{rfw} = 1900$ MHz pro typ druhý, [6], [20].

Nyní je zapotřebí nastavit vlastnosti jednotlivých rozhraní - zejména plochy mobilu, která se dotýká hlavy. Tato bude nastavena jako takzvaný „soustředěný port“ - místo, kde dochází k vyzařování. Vstupní napětí bude mít hodnotu: $V_{in} = 54,5$ V, dále impedance externího kabelu bude mít velikost $Z_0 = 75 \Omega$ pro frekvenci 835 MHz a $Z_0 = 50 \Omega$ pro 1900 MHz, [20], [6]. Nyní bude následovat generace sítě (mesh), která bude prvního, druhého i třetího řádu (lineární, 2D a 3D objekty), neboť se pracuje s 3D objekty. Nyní stačí vyřešit daný model.

Postup bude následující. Nejprve je třeba vyřešit tuto situaci z hlediska šíření elektromagnetických vln a zobrazit rozložení specifického absorbovaného výkonu SAR. Toto řešení bude následně použito pro určení teplotních změn v lidské tkáni.

5.6 Výpočet hodnoty SAR

Prostředí Comsol Multiphysics umožňuje zobrazit přímo rozložení hodnot specifické míry absorpce SAR. Stačí si pro každou vrstvu tkáně nadefinovat funkci podle následující rovnice:

$$SAR = \frac{\sigma E_i^2}{\rho} \quad (47)$$

Velikost hodnoty SAR je tedy získána dosazením hodnot hustoty a konduktivity jednotlivých tkání. Po skončení výpočtu daného problému se zobrazí rozložení velikosti SAR zadáním příkazu pro vykreslení dané funkce - například pro vrstvu svaloviny by to byla funkce s názvem *dSAR_muscle*.

5.7 Grafické řešení - SAR

Jak již bylo řečeno, program Comsol Multiphysics provádí výpočet daného problému metodou konečných prvků. Pro problematiku elektromagnetického vlnění využívá následujících rovnic pro určení hodnot intenzit jednotlivých polí:

Rozložení intenzity elektrického pole, [6]:

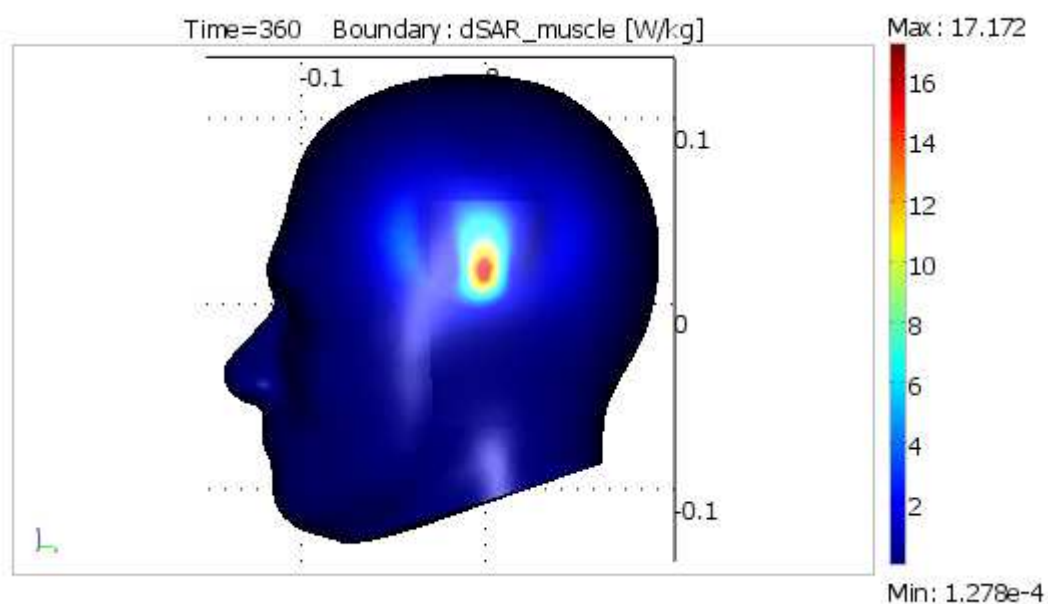
$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E_z) - \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) k_0^2 E_z = 0 \quad (48)$$

Rozložení intenzity magnetického pole, [6]:

$$\nabla \times \left(\left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right)^{-1} \nabla H_z \right) - \mu_r k_0^2 H_z = 0 \quad (49)$$

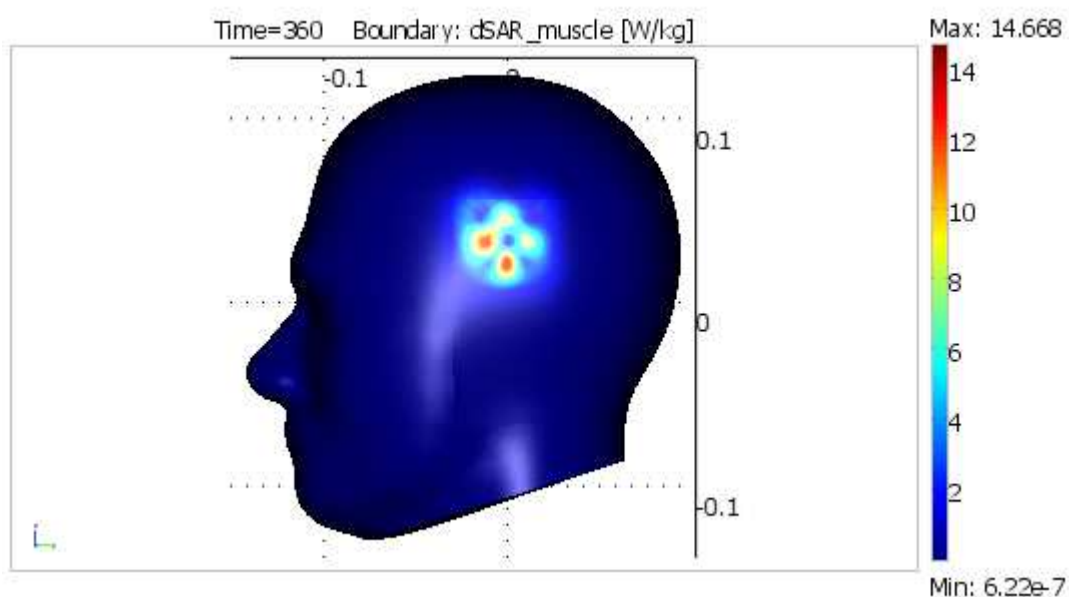
kde: ∇ ... operátor Curl

Rozložení hodnot SAR ve svalovině lebky:



Obrázek č. 25: Rozložení hodnot SAR ve svalovině lebky - frekvence 835 MHz.

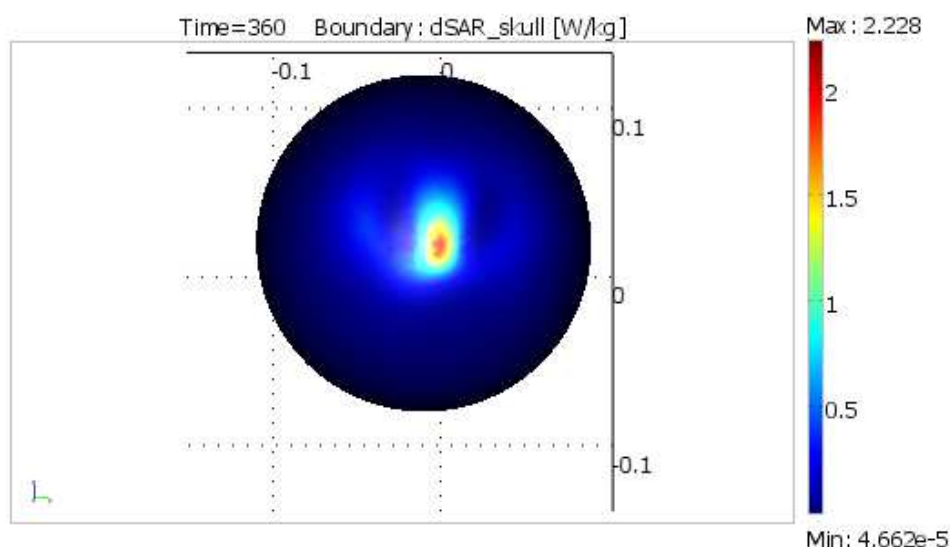
Pro mobilní telefon pracující na frekvenci 835 MHz bylo získáno rozložení hodnot SAR ve svalovině lebky, které je zobrazeno na Obrázku č. 25. Pomocí funkce $[m,p] = \text{postmax}(\text{fem}, 'd\text{SAR_muscle}')$ došlo ke stanovení nejvyšší hodnoty v této subdoméně i její souřadnice, [6]. Tato hodnota byla rovna 19,4705 W/kg.



Obrázek č. 26: Rozložení hodnot SAR ve svalovině lebky - frekvence 1900 MHz.

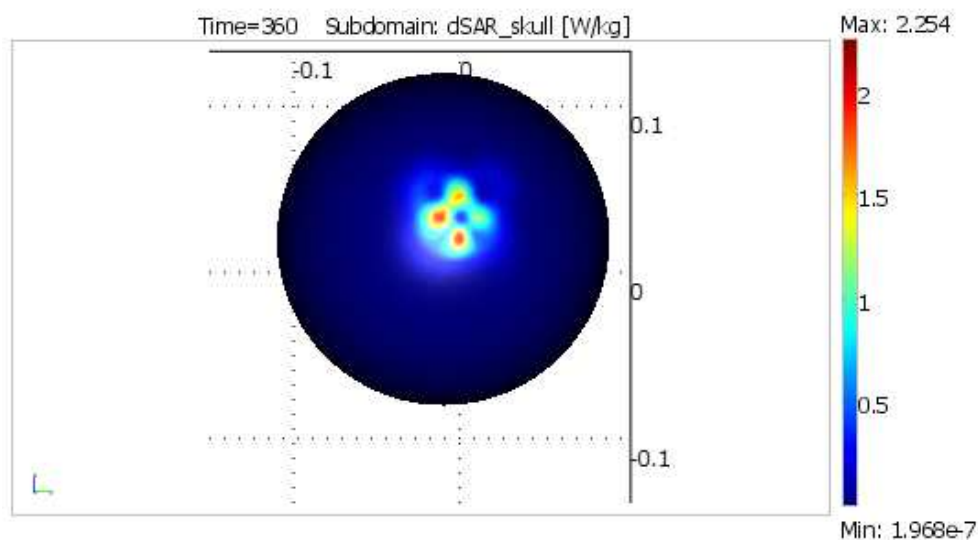
Pro model s mobilem pracujícím na frekvenci 1900 MHz byl obdržen výsledek, který můžeme vidět na Obrázku č. 26. Lze konstatovat, že v tomto případě je toto rozložení mnohem výrazněji zdeformované. Po využití stejné funkce jako v předchozím případě hodnota v bodě s nejvyšší hodnotou SAR dosáhla 14,8560 W/kg. Tedy výrazně méně, než v případě předchozím.

Rozložení hodnot SAR v lebeční kosti:



Obrázek č. 27: Rozložení hodnot SAR v lebeční kosti - frekvence 835 MHz.

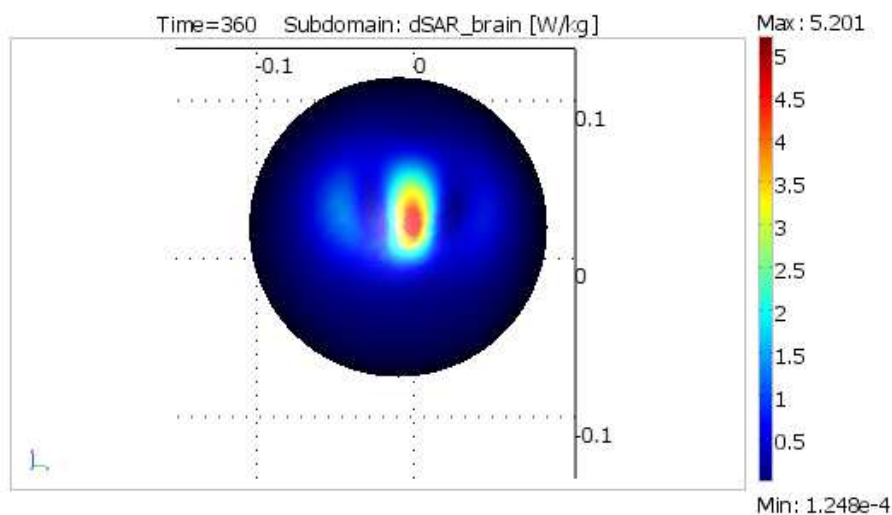
Na Obrázku č. 27 je rozložení hodnot SAR v lebeční kosti pro frekvenci 835 MHz. Funkcí byla nalezena maximální hodnota, která dosahovala 2,5943 W/kg.



Obrázek č. 28: Rozložení hodnot SAR v lebeční kosti - frekvence 1900 MHz.

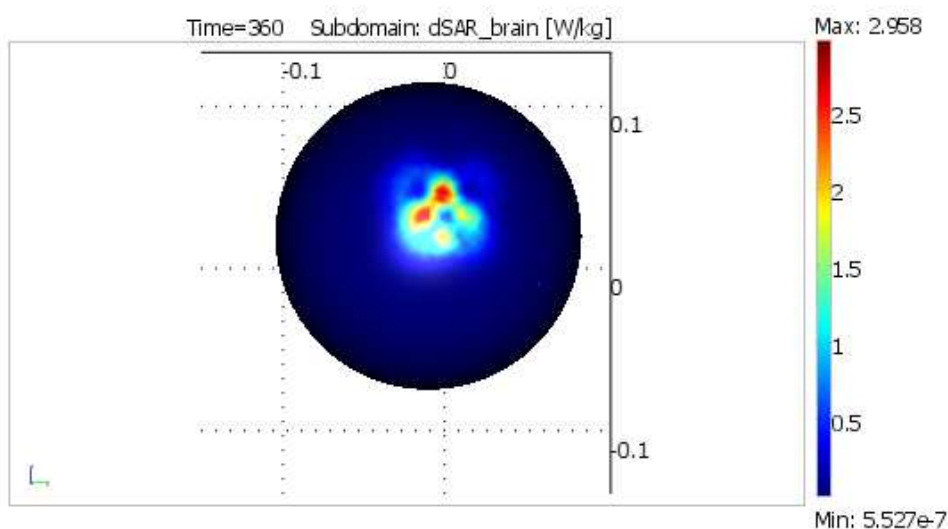
Pro případ s anténou pracující na frekvenci 1900 MHz byla tato maximální hodnota SAR v lebeční kosti rovna 2,3416 W/kg. V obou případech tato hodnota výrazně klesla. Rozdíl mezi oběmi maximálními hodnotami činí cca 0,25 W/kg. Výsledné rozložení hodnot SAR je patrné z Obrázku č. 28.

Rozložení hodnot SAR v mozku:



Obrázek č. 29: Rozložení hodnot SAR v mozku - frekvence 835 MHz.

Pro podoblast mozku při použití apertury pracující na frekvenci 835 MHz byla obdržena maximální hodnota SAR rovna 5,8061 W/kg. Rozložení těchto hodnot je vidět na Obrázku č. 29.



Obrázek č. 30: Rozložení hodnot SAR v mozku - frekvence 1900 MHz.

Při použití mobilního telefonu, jehož anténa pracuje na frekvenci 1900 MHz, bylo obdrženo rozložení hodnot SAR, které je vyobrazeno na Obrázku č. 30. V této podoblasti mozku dosahuje maximální hodnota SAR velikosti 3,6988 W/kg, což je výrazně méně než v případě prvním.

Výpočet hodnoty SAR dle nařízení vlády č. 1/2008 Sb. :

Hodnota SAR bude stanovena dle nařízení vlády č. 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. Vzhledem k faktu, že oblastí zájmu je lidská hlava, tak bude hodnota SAR stanovena jako středovaná pro kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 g tkáně s výjimkou rukou, zápěstí, chodidel a kotníků. Těchto 10 g je třeba volit ve tvaru krychle, nikoli jako plochý útvar na povrchu těla. Tato hodnota by neměla přesáhnout 2 W/kg, v případě, že se nejedná o pracovníky, [4].

Nejprve je zapotřebí vypočítat velikost této krychle. Za tím účelem se využije následujícího vztahu:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (50)$$

Za objem lze dosadit objem krychle o straně a , jejíž hmotnost je 10 g:

$$a^3 = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{\rho} \Rightarrow a = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 10^{-3}}{\rho}}$$

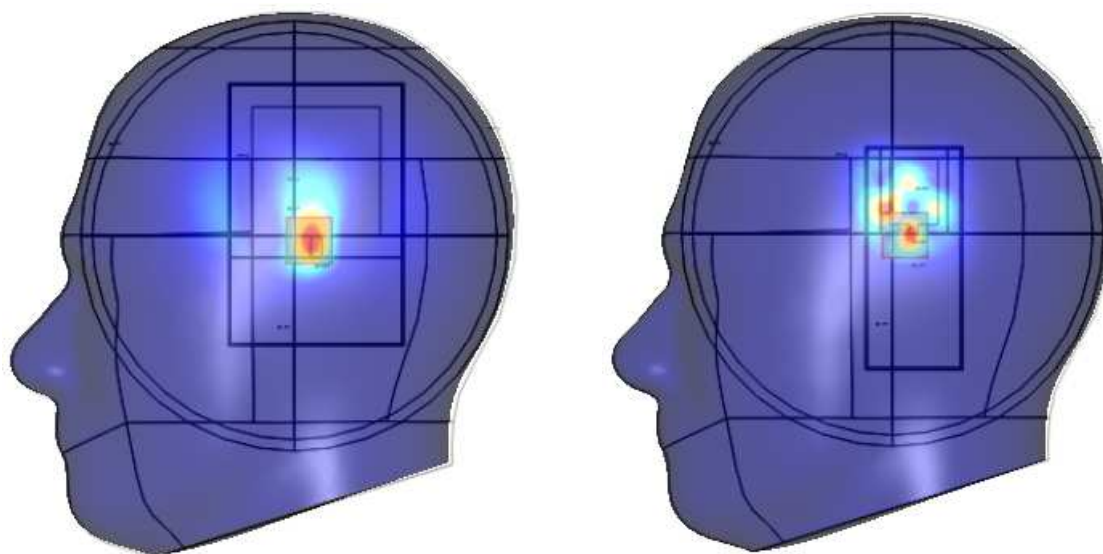
Nyní již stačí dosadit velikosti hustoty jednotlivých tkání, které se nacházejí v Tabulce č. 4, a vypočítat velikost strany krychle:

$$a_{svalovina} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 10^{-3}}{1030}} = 0,02133 = \underline{\underline{21,33mm}}$$

$$a_{lebka} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 10^{-3}}{1850}} = 0,01755 = \underline{\underline{17,55mm}}$$

$$a_{mozek} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 10^{-3}}{1040}} = 0,02126 = \underline{\underline{21,26mm}}$$

Jako výsledná velikost strany krychle byla zvolena největší hodnota 21,3 mm, neboť je téměř totožná s velikostí jak pro mozek, tak pro svalovinu. Nyní je třeba umístit tuto krychli do našeho modelu. Pro její umístění byl zvolen následující postup - nejprve byly určeny souřadnice bodu, kde se nachází maximum hodnoty SAR. Tento bod byl zvolen jako střed krychle o straně $a = 21,3 \text{ mm}$. Následně byla tato krychle posunována ve směru do vnitřku hlavy až do chvíle, kdy vnější hrana této krychle splývala se stěnou hlavy. Pozice těchto krychlí pro frekvence 835 MHz a 1900 MHz jsou vidět na Obrázku č. 31.



Obrázek č. 31: Pozice krychlí pro frekvenci a) 835 MHz a b) 1900 MHz

Nyní bylo třeba určit velikosti hodnot SAR v jednotlivých bodech uvnitř této krychle. Pro toto určení stačilo zjistit rozsah hodnot, kterých nabývá tato krychle v prostoru. Rozestup (vzorkování) jednotlivých bodů byl zvolen 0,0001. Následně byly exportovány hodnoty v těchto bodech do textového souboru. Pro každou vrstvu tkáně vznikl jeden textový soubor s hodnotami. Nyní proběhlo zpracování těchto hodnot v programu Matlab pro získání průměrné hodnoty SAR v této krychli. Výsledná rovnice pro výpočet průměrné hodnoty SAR měla následující tvar:

$$SAR_{av} = (SAR_{brain} + SAR_{skull} + SAR_{muscle}) / length(globSAR_{muscle});$$

Kde: SAR_{brain} , SAR_{skull} , SAR_{muscle} - celkové velikosti SAR v dané tkáni

$length(globSAR_{muscle})$ - počet prvků celé krychle

Tabulka č. 6: Sumované hodnoty SAR v jednotlivých tkáních a hodnoty průměrné

	Sumovaná hodnota SAR - svalovina lebky [W/kg]	Sumovaná hodnota SAR - lebeční kost [W/kg]	Sumovaná hodnota SAR - mozek [W/kg]	Průměrná hodnota SAR [W/kg]
Frekvence 835 MHz	$3.2898 \cdot 10^5$	$2.0770 \cdot 10^6$	$1.6560 \cdot 10^7$	1.9352
Frekvence 1900 MHz	$5.6458 \cdot 10^5$	$1.3045 \cdot 10^6$	$3.3645 \cdot 10^6$	0.5340

V Tabulce č. 6 jsou v prvních třech sloupcích zaneseny sumované hodnoty SARu v jednotlivých vrstvách biologických tkání v rámci krychle o hmotnosti 10 g a o délce hrany $a = 21,3 \text{ mm}$. V prvním řádku se vyskytují hodnoty pro frekvenci 835 MHz, v druhém potom hodnoty pro frekvenci 1900 MHz. Průměrná hodnota SAR ve čtvrtém sloupci byla poté vypočtena za pomoci Matlabu výpočtem výše uvedené formule pro proměnnou SAR_{av} .

Pro model s telefonem pracujícím na frekvenci 835 MHz byla obdržena průměrná hodnota SAR rovna 1,9352 W/kg, zatímco pro mobil, který využívá frekvenci 1900 MHz, byla tato hodnota výrazně nižší - 0,5340 W/kg. Pro obě hodnoty lze konstatovat, že v žádném z případů nebyla překročena nejvyšší přípustná hodnota 2 W/kg stanovená nařízením vlády č. 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením.

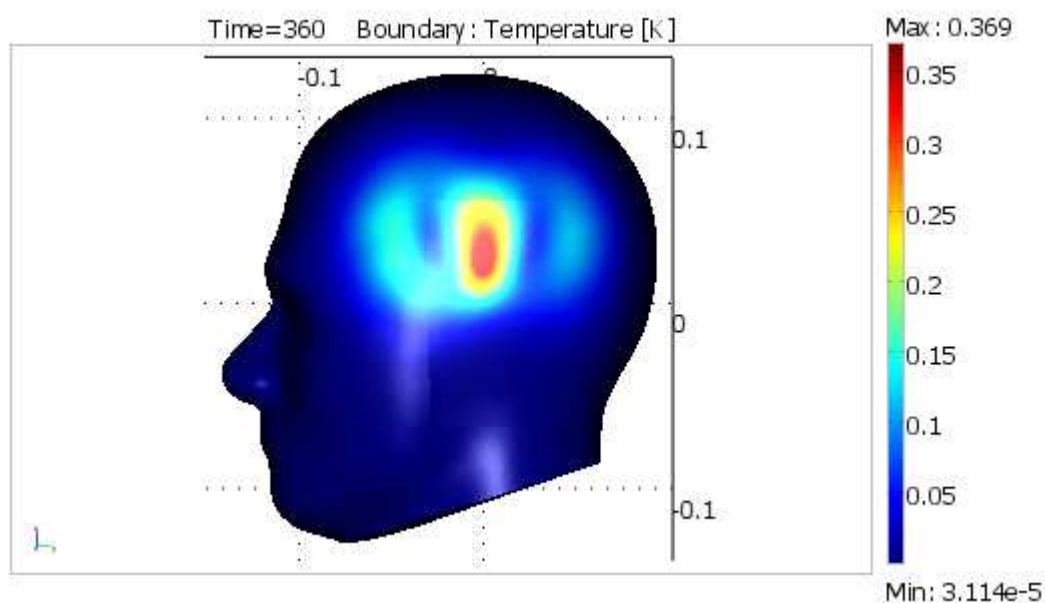
5.8 Grafické řešení - teplotní změny tkáně

Pro výpočet teplotních změn v jednotlivých objektech je v programu Comsol Multiphysics opět využita metoda konečných prvků. V tomto případě má rovnice, podle které je tento výpočet prováděn v modulu s názvem Modul přenosu tepla, následující tvar, [6]:

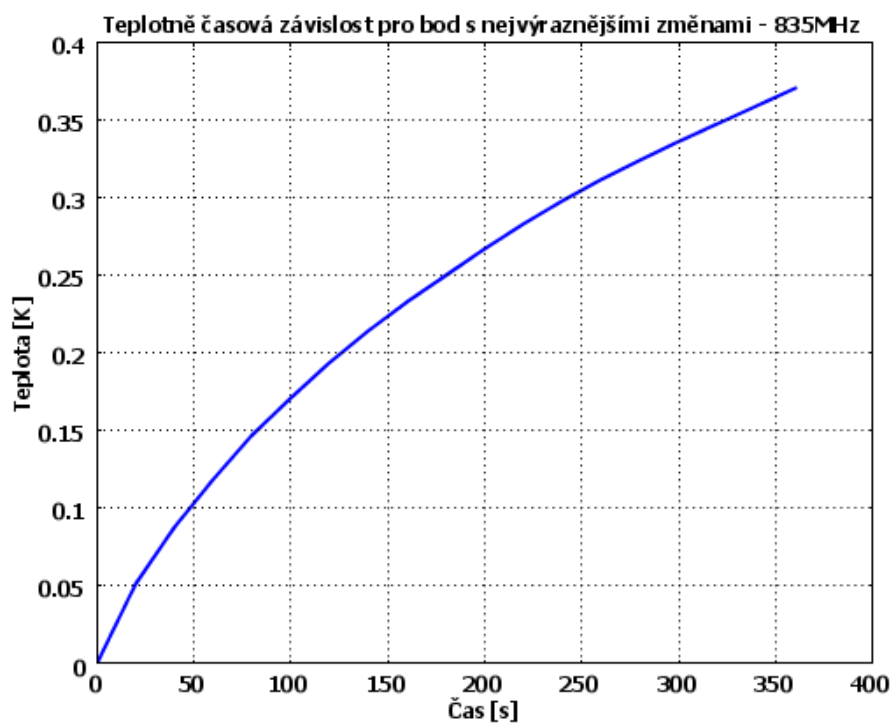
$$\delta_{ts} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(0) = Q \quad (51)$$

kde: ∇ ... operátor Curl

Teplotní změny tkáně - anténa s frekvencí 835 MHz:



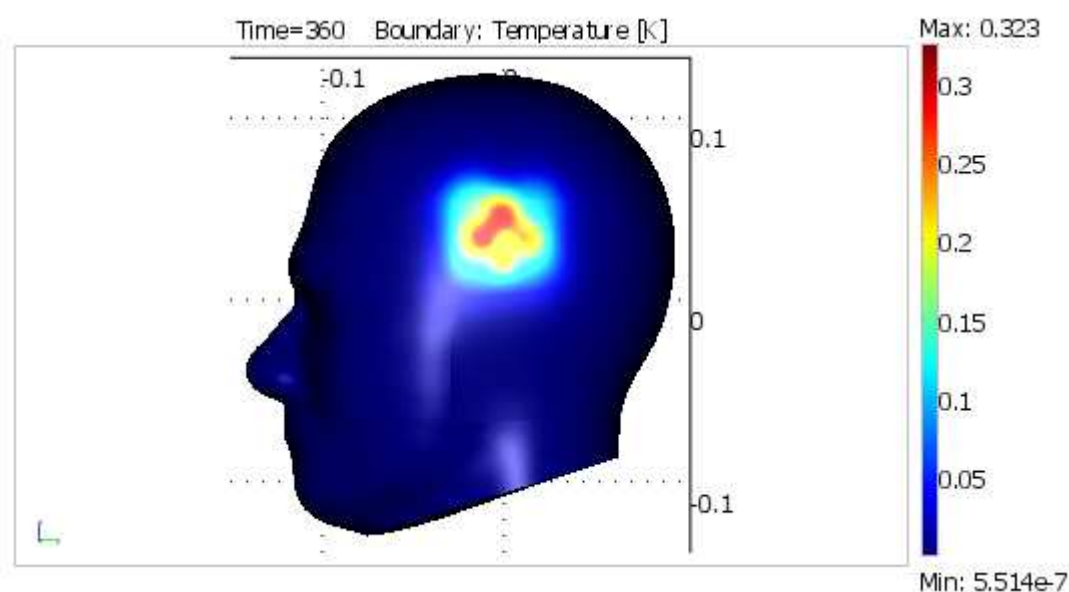
Obrázek č. 32: Teplotní změny tkáně - anténa s frekvencí 835 MHz



Obrázek č. 33: Teplotně časová závislost pro bod s nejvýraznějšími změnami - 835 MHz

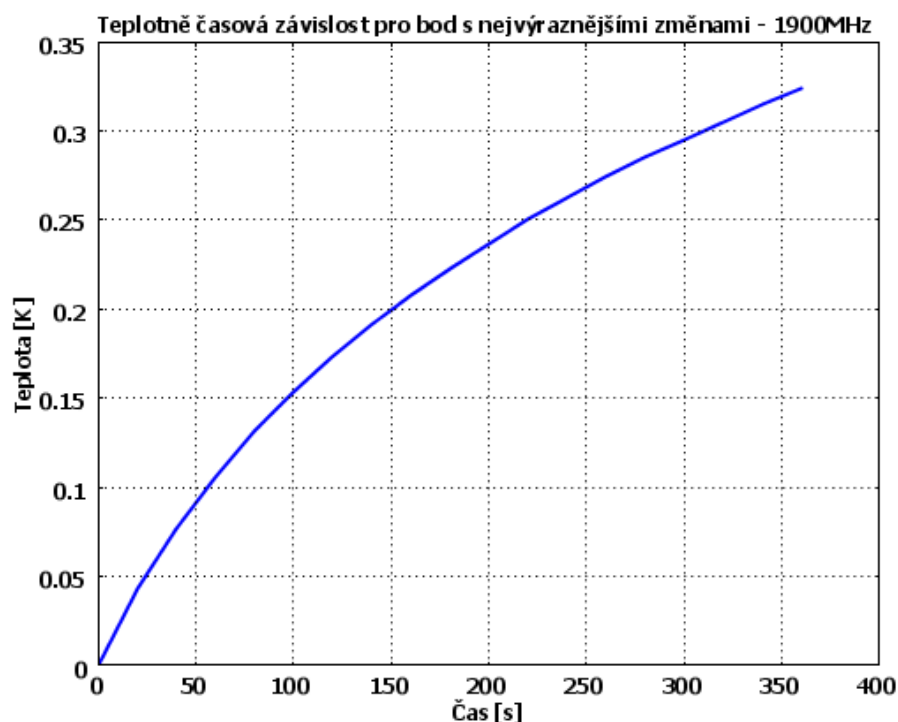
Pro model mobilního telefonu, jehož anténa pracuje na frekvenci 835 MHz , bylo obdrženo rozložení teplotních změn, které je vyobrazeno na Obrázku č. 32. Vyskytuje se zde jedno hlavní působiště. Využitím funkce pro vyhledání maximální hodnoty teplotní difference byl získán výsledek $0,3698\text{ K}$. Pro bod, o těchto souřadnicích byla vynesena teplotně časová závislost, která je zobrazena na Obrázku č. 33. Jedná se o nelineární závislost, která je vykreslena pro dobu 360 sekund, tedy 6 minut, jak je stanoveno normou.

Teplotní změny tkáně - anténa s frekvencí 1900 MHz :



Obrázek č. 34: Teplotní změny tkáně - anténa s frekvencí 1900 MHz

Rozložení teplotních změn pro aparaturu pracující na frekvenci 1900 MHz lze vidět na Obrázku č. 34. Je patrné, že je zde více ohnisek s maximální teplotní změnou, což odpovídá deformovanému rozložení hodnot SAR z Obrázku č. 26. Opět bylo využito stejné funkce jako v případě předešlém, aby byly nalezeny souřadnice bodu s nejmarkantnějšími teplotními změnami. Hodnota teplotní změny v tomto bodě odpovídala $0,3238\text{ K}$, což je téměř o půl stupně méně v případě předchozím. Pro tento bod byla opět vynesena teplotně časovou závislost pro čas 360 sekund. Na Obrázku č. 35 je vidět, že se jedná o obdobný trend jako v případě předchozím. Tato závislost je tedy nelineární a má exponenciálně rostoucí charakter.



Obrázek č. 35: Teplotně časová závislost pro bod s nejvýraznějšími změnami - 1900 MHz

Výpočet průměrné hodnoty teplotní změny pro 10 g tkáně

Pro výpočet průměrné teplotní změny v oblasti definované pro 10 g tkáně byla vybrána stejná krychle jako na Obrázku č. 31. Navzorkováním bodů uvnitř oblasti a exportem těchto údajů byl vytvořen textový soubor. Následně byl tento soubor zpracován v Matlabu. Výstupem byla průměrná teplotní změna v tomto objemu. Výsledné hodnoty jsou patrné z Tabulky č. 7. V prvním sloupci jsou hodnoty sumované pro daný objem 10 g. Průměrná hodnota teplotní změny byla vypočtena z hodnoty sumované dělením této hodnoty počtem bodů, ve kterých bylo vzorkováno. Hodnoty průměrné pro obě pracovní frekvence se nacházejí ve sloupci druhém.

Pro mobilní telefon pracující na frekvenci 835 MHz byla tato hodnota rovna 0,1742 K. V případě druhém, kdy byl zdrojem elektromagnetického vlnění mobilní telefon pracující na frekvenci 1900 MHz, tato teplotní změna klesla na hodnotu 0,0722 K, což je údaj více než o polovinu nižší než v případě předešlém.

Tabulka č. 7: Sumované a průměrné hodnoty teplotních změn pro 10 g tkáně

Frekvence	Sumovaná hodnota teplotní změny pro 10 g tkáně [K]	Průměrná hodnota teplotní změny pro 10 g tkáně [K]
835 MHz	$1.7075 \cdot 10^6$	0.1742
1900 MHz	$7.0759 \cdot 10^5$	0.0722

5.9 Zhodnocení dosažených výsledků

Výpočet hodnot SAR proběhl vždy pro všechny vrstvy tkání a to pro dva modely - v prvním případě se jednalo o model s mobilním telefonem pracujícím na frekvenci 835 MHz a poté pro aparaturu, jejíž elektromagnetické vlnění mělo frekvenci 1900 MHz. Oba telefonní přístroje se nacházeli ve vzdálenosti 10 mm od hlavy, což odpovídá vzdálenosti při klasickém telefonním hovoru. Na základě znalosti hodnot SAR v jednotlivých tkáních bylo třeba určit krychli, jejíž strana má takovou velikost, aby pojala 10 g tkáně, jak je stanoveno normou. Tato krychle byla umístěna do hlavy tak, aby zahrnovala oblast s co možná nejvyššími hodnotami SAR. Poté následovalo navzorkování hodnot SAR uvnitř této krychle a uložení do tří různých textových souborů, z nichž v každém byla obsažena informace pro danou vrstvu tkáně. Data, která tyto soubory obsahovaly, byla následně zpracována v programu Matlab, tak aby byla obdržena průměrná hodnota SAR uvnitř této krychle.

Pro aparaturu pracující na frekvenci 835 MHz byla tato průměrná hodnota rovna 1,9352 W/kg, zatímco pro frekvenci 1900 MHz byla získána hodnota výrazně nižší, tedy 0,5340 W/kg. Lze konstatovat, že v žádném z případů nebyla překročena nejvyšší přípustná hodnota 2 W/kg stanovená nařízením vlády č. 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením.

Všechny výpočty v programovém prostředí Comsol Multiphysics 3.5 byly prováděny na počítačové sestavě o následujícím složení:

- Operační systém: Windows 7 Professional (x64)
- Procesor: Intel Core 2 Quad Q6600 - 2400 MHz
- Operační paměť: 2 x 2048 MBytes, DDR2 - SDRAM OCZ, 400 MHz

6. Závěr

V diplomové práci byly zpracovány základní poznatky z oblasti teorie elektromagnetického pole. Na základě Maxwellových rovnic bylo určeno jejich řešení, tedy zobecněné vlnové rovnice. Díky vlnovým rovnicím se podařilo prostudovat chování rovinných harmonických vln v dielektriku, jejich disperzi, odraz a lom vlnění na rozhraní. Stejně tak i mezi dvěma dielektriky. Součástí této části diplomové práce byla také studie pole elektrického a magnetického dipólu.

Následně byla prostudována hygienická norma - Nařízení vlády č. 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, v níž se nachází nejvyšší přípustné hodnoty SAR. Tyto hodnoty byly použity v modelovém prostředí, stejně jako příslušné vztahy pro výpočet konkrétních hodnot SAR. V této části diplomové práce byly taktéž probrány účinky neionizujícího záření na lidský organismus.

Pro modelovou studii bylo potřeba znát základní parametry antén mobilů. Jednalo se o pracovní frekvenci, intenzitu elektrického pole, napájecí napětí, impedanci externího kabelu a geometrické rozměry apertur. Touto tematikou se zabývala následující kapitola diplomové práce. Byly vyjmenovány a popsány charakteristiky antén externích. Tyto typy antén jsou již v dnešní době nahrazovány progresivnější mikropáskovou technologií. Existuje šest typů těchto planárních antén, jejichž konstrukční řešení a parametry byly uvedeny v této části diplomové práce. Pro modelovou studii byla zvolena konstrukce flíčkové antény, která je nejvíce používanou interní anténou v komerčních aplikacích pro mobilní komunikaci. Hlavní důvod je ten, že její rozměry jsou miniaturní, což ji dělá vhodnou pro montáž do mobilních zařízení. Pro jednotlivé typy antén byly uvedeny vyzařovací diagramy.

Pro konkrétní modelové řešení bylo vybráno vhodné modelové prostředí. V tomto případě byl využit program Comsol Multiphysics v3.5. Pro získání měsíční zkušební verze tohoto produktu bylo třeba kontaktovat emailem firmu COMSOL, Inc. Na základě této žádosti bylo zasláno DVD s programem Comsol Multiphysics v3.5 a to distribuční firmou pro Českou Republiku, HUMUSOFT s.r.o.

V následující části diplomové práce se nachází popis využitého programového prostředí Comsol Multiphysics v3.5. V této části diplomové práce se rovněž nachází popis radiofrekvenčního modulu, který je vhodný pro modelování mikrovlnných zařízení. RF modul byl využit pro konkrétní modelové řešení.

Další část diplomové práce pojednává o konkrétním modelovém řešení problému. Nejprve byly v modelovém prostředí namodelovány dvě antény mobilních telefonů pro dvě různé frekvence 835 MHz a 1900 MHz a model lidské hlavy tvořený třemi vrstvami biologických tkání - svalovinou lebky, lebeční kostí a mozkem. Všem těmto objektům byly přiřazeny patřičné parametry.

Model byl nejprve vyřešen z hlediska elektromagnetické interakce antény s modelem lidské hlavy. Výsledkem bylo grafické zobrazení prostorového rozložení velikosti SAR na Obrázcích č. 25 - 30. V modelovém prostředí byla naprogramována rovnice pro výpočet hodnoty SAR. V dalším kroku byla navržena krychle o délce strany $a = 21,3 \text{ mm}$, tak aby její velikost odpovídala hmotnosti 10 g biologické tkáně, jak je stanoveno normou. Hodnoty uvnitř této krychle byly vyexportovány do textového souboru, který byl zpracován programem Matlab. Výstupem programu byla průměrná hodnota SAR uvnitř krychle o hmotnosti 10 g. Pro frekvenci 835 MHz byla tato hodnota rovna 1,9352 W/kg. Pro frekvenci 1900 MHz byla tato hodnota výrazně nižší a dosahovala 0,5340 W/kg. Obě tyto hodnoty vyhovují nařízení vlády č. 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, které stanovuje nejvyšší přípustnou hodnotu SAR 2 W/kg. Obě hodnoty jsou uvedeny v Tabulce č. 6.

Na modelové řešení elektromagnetické interakce navazovalo řešení teplotně - časových změn v biologických tkáních. Časový interval byl nastaven na 60 sekund, jak stanovuje hygienická norma. Výsledkem bylo grafické zobrazení prostorového rozložení teplotně časových změn v biologických tkáních na Obrázcích č. 32 a 34. Pro bod s nejvyšší teplotní změnou byly vyneseny teplotně časové závislosti (viz. Obrázky č. 33 a 35) pro frekvence 835 MHz a 1900 MHz, které měly obě nelineární a exponenciálně rostoucí charakter. Pro modely na obou frekvencích byla stanovena průměrná hodnota teplotní změny pro 10 g biologické tkáně. Pro frekvenci 835 MHz byla tato hodnota rovna 0,1742 K. Pro frekvenci 1900 MHz byla tato hodnota výrazně nižší a dosahovala 0,0722 K. Obě hodnoty jsou uvedeny v Tabulce č. 7.

Tato diplomová práce popisuje vliv elektromagnetického vlnění na biologické tkáně. Podařilo se určit velikost hodnoty SAR absorbovanou biologickou tkání pro dvě různé frekvence a zjistit, zda je dodržena nejvyšší přípustná hodnota SAR stanovená platnou hygienickou normou. V této diplomové práci se podařilo určit teplotně - časové změny v biologické tkáni. Zadání diplomové práce bylo splněno v plném rozsahu.

Literatura

- [1] L. HAŇKA: *Teorie elektromagnetického pole*, SNTL, Praha 1975
- [2] J. ROZMAN, M. CHMELAR, K. JEHLIČKA: *Terapeutická a protetická technika*, Skripta VUT, Brno 2004
- [3] D. ČERNOHORSKÝ, Z. NOVÁČEK: *Antény a šíření elektromagnetických vln*, Nakladatelství VUT Brno, Brno 1992
- [4] Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením č. 1/2008 Sb.
- [5] Z. PŠENÁKOVÁ, V. PŠENÁK: *Electromagnetic Heating of Human Tissue*. Dostupné z: <<http://caca.xicht.net/down.php?id=2914>>, 2004
- [6] *Comsol Multiphysics v3.5 - user manual*. Dostupné z: <<http://www.comsol.com/>>.
- [7] *Elektromagnetická kompatibility* [online]. 2007, poslední revize 20.11. 2007. Dostupné z: <www.elsmog.cz/emc_kardiostimul.doc>.
- [8] *Reconfigurable Antenna* [online]. 2007, poslední revize 22.11.2007. Dostupné z: <<https://www.sdrforum.org/pages/sdr05/5.4%20Reconfigurable%20Antenna/5.4-01%20Yun%20et%20al.pdf>>.
- [9] *Mobile Phone Antenna Parameters* [online]. 2007, poslední revize 24.11.2007. Dostupné z: <www.eurasip.org/Proceedings/Ext/ISCCSP2006/defevent/papers/cr1223.pdf>.
- [10] *Elektrina a magnetismus* [online]. 2007, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/elmg/exkurze_rad.html>.
- [11] *Radiation Patterns* [online]. 2007, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <<http://www.kyes.com/antenna/navy/rpatterns/radiapat.htm>>.
- [12] *Antenna Types* [online]. 2007, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <<http://www.pacificaerials.co.nz/antInfo/antennaTypes.htm>>.
- [13] POKORNÝ, M. *Vícepásmové planární antény*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Dostupné z: <www.ieee.cz/mtt/soutez07/Pokorny.pdf>, 2006.
- [14] KHALATBARI, S., SARDARI D., MIRARZAEI, A. A., and SADAFI, H. A. *Calculating SAR in Two Models of the Human Head Exposed to Mobile Phones Radiations at 900 and 1800MHz* [online]. 2006, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <<http://piers.mit.edu/piersonline/download.php?file=MDUwOTA1MTkwNjUzfFZvbDJObzFQYWdlMTA0dG8xMDkucGRm>>.
- [15] *Microwave Materials* [online]. 1998, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <www.arlon-med.com/AR320.pdf>.
- [16] *Thermal Properties for PCBs* [online]. 2007, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <http://www.frigprim.com/online/cond_pcb.html>.
- [17] *Thermal Conductivity Science* [online]. 2008, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <<http://www.hukseflux.com/thermal%20conductivity/thermal.htm>>.
- [18] *Fyzikální vlastnosti technických plastů* [online]. 2007, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <<http://www.tribon.cz/plasty/-tivar.htm>>.
- [19] EBRAHIMI-GANJEH, M. A. *Interaction Of Dual Band Helical And PIFA Handset Antennas With Human Head And Hand* [online]. 2007, poslední revize 9.4.2008. Dostupné z: <<http://ceta.mit.edu/pier/pier77/18.07081804.Ebrahimi.A.pdf>>.
- [20] *Microstrip patch antenna design and results* [online]. 2009, poslední revize 9.4.2009. Dostupné z: <<http://etd.lib.fsu.edu/theses/available/etd04102004143656/unrestricted/Chapter4.pdf>>

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek č. 1: Odraz a lom vlnění - Vektor \overline{E}_0 kolmý k rovině dopadu.....	14
Obrázek č. 2: Odraz a lom vlnění - Vektor \overline{E}_0 rovnoběžný s rovinou dopadu.	15
Obrázek č. 3: Referenční úrovně - Elektrické pole E a magnetická indukce B , [4]	19
Obrázek č. 4: Oteplení tkání v závislosti na expozici.....	21
Obrázek č. 5: Frekvenční závislost absorbovaného výkonu.....	21
Obrázek č. 6: Antény mobilních telefonů: a) Čtvrtvlnný monopól, b)Šroubovice.....	22
Obrázek č. 7: Vyzařovací diagram čtvrtvlnné antény.....	23
Obrázek č. 8: Vyzařovací diagram spirálovité antény.....	23
Obrázek č. 9: Planární flíčková anténa napájena: a) mikropáskovým vedením, b).....	24
Obrázek č. 10: Vyzařovací diagramy antény pro $f = 1,227 \text{ GHz}$	25
Obrázek č. 11: Prostorové uspořádání konstrukce PIFA.....	25
Obrázek č. 12: Prostorové uspořádání konstrukce PIFA se skládaným flíčkem.....	26
Obrázek č. 13: Vyzařovací diagramy antény pro frekvenci $f = 920 \text{ MHz}$	26
Obrázek č. 14: Dvoupásmové nízkoprofilové planární monopóly: a) se zářezy, b).....	27
Obrázek č. 15: Vyzařovací diagramy antény pro frekvenci $f = 900 \text{ MHz}$	27
Obrázek č. 16: Dvoupásmová štěrbinová anténa.....	27
Obrázek č. 17: Postup tvorby: a) Kochovy křivky, b) Sierpinského monopólu.....	29
Obrázek č. 18: Vyzařovací diagramy antény pro frekvence $f = 360 \text{ MHz}$, 980 MHz a.....	29
Obrázek č. 19: Chipová anténa - ukázka rozměrů.....	31
Obrázek č. 20: Oblasti aplikací RF Modulu, [6].....	34
Obrázek č. 21: Výběr modulů.....	35
Obrázek č. 22: 3D model lidské hlavy.....	36
Obrázek č. 23: Model mobilního telefonu - 835 MHz , pohled zprava, zepředu a shora	37
Obrázek č. 24: Model mob. telefonu - 1900 MHz , pohled zprava, zepředu a shora.....	37
Obrázek č. 25: Rozložení hodnot SAR ve svalovině lebky - frekvence 835 MHz	40
Obrázek č. 26: Rozložení hodnot SAR ve svalovině lebky - frekvence 1900 MHz	40
Obrázek č. 27: Rozložení hodnot SAR v lebeční kosti - frekvence 835 MHz	41
Obrázek č. 28: Rozložení hodnot SAR v lebeční kosti - frekvence 1900 MHz	41
Obrázek č. 29: Rozložení hodnot SAR v mozku - frekvence 835 MHz	42
Obrázek č. 30: Rozložení hodnot SAR v mozku - frekvence 1900 MHz	42
Obrázek č. 31: Pozice krychlí pro frekvenci a) 835 MHz a b) 1900 MHz	44
Obrázek č. 32: Teplotní změny tkáně - anténa s frekvencí 835 MHz	46
Obrázek č. 33: Teplotně čas. závislost pro bod s nejvýraznějšími změnami - 835 MHz	46
Obrázek č. 34: Teplotní změny tkáně - anténa s frekvencí 1900 MHz	47
Obrázek č. 35: Teplotně časová závislost pro bod s nejvýraznějšími změnami -	48
Tabulka č. 1: Nejvyšší přípustné hodnoty měrného absorbovaného výkonu, [4].....	18
Tabulka č. 2: Přidělená kmitočtová pásma pro komunikační systémy, [13]	30
Tabulka č. 3: Výpočet intenzity elektromagnetického pole mobilního telefonu.....	30
a) Parametry jednotlivých tkání:.....	38
Tabulka č. 4: Parametry tkání pro simulaci (pro frekvence 1900 a 835 MHz).....	38
b) Parametry mobilního telefonu:	38
Tabulka č. 5: Parametry mobilního telefonu (pro frekvence 1900 a 835 MHz)	38
Tabulka č. 6: Sumované hodnoty SAR v jednotlivých tkáních a hodnoty průměrné.....	45
Tabulka č. 7: Sumované a průměrné hodnoty teplotních změn pro 10 g tkáně.....	49

Seznam použitých zkratek a symbolů

PIFA	- Planar Inverted-F Antenna, Planární anténa obrácené F
ϵ_r	- Relativní permitivita
GSM	- Global System for Mobile Communications
SAR	- Specific Absorption Rate, Měrný absorbovaný výkon
J_0	- Hustota elektrického proudu
ρ_0	- Hustota elektrického náboje
E	- Intenzita elektrického pole
B	- Magnetická indukce
D	- Elektrická indukce
H	- Intenzita magnetického pole
$\sum I$	- Celkový kondukční nebo konvekční proud volných nábojů
$\sum Q$	- Celkový volný náboj obsažený v objemu obaleném plochou S
ψ	- Tok intenzity elektrického pole
Φ	- Magnetický (indukční) tok
ϵ	- Permitivita
μ	- Permeabilita
γ	- Konduktivita
k	- Konstanta šíření
Z	- Charakteristická impedance
β	- Měrný útlum
α	- Fázová konstanta
ω	- Úhlová rychlost
v_f	- Fázové rychlost
c	- Rychlost světla
ϑ_0	- Úhel dopadu
ϑ_1	- Úhel odrazu
ϑ_2	- Úhel lomu
E_i	- Intenzita elektrického pole uvnitř tělesné tkáně
σ	- Elektrická vodivost tkáně těla
c_i	- Měrná tepelná kapacita tělesné tkáně
J	- Indukovaná proudová hustota v tělesné tkáni
SA	- Měrná absorbovaná energie
P_{in}	- Výkon antény
E_0	- Intenzita elektrického pole antény
nu_{c0}	- Cutoff frekvence antény
c_s	- Specifické oteplení
k	- Tepelná vodivost
ρ	- Hustota
∇	- Operátor Curl
nu_{rfw}	- Frekvence šířící se elektromagnetické vlny

Seznam příloh

Příloha 1 - m - file pro stanovení průměrné hodnoty SAR - 835 *MHz*

Příloha 2 - m - file pro stanovení průměrné hodnoty SAR - 1900 *MHz*

Příloha 3 - m - file pro stanovení průměrné teplotní změny - 835 *MHz*

Příloha 4 - m - file pro stanovení průměrné teplotní změny - 1900 *MHz*

Příloha 1 - m - file pro stanovení průměrné hodnoty SAR - 835 MHz

```
clear all
close all
clc

i = 0; % index
count_muscle = 0; % pocet nulovych prvku
count_skull = 0;
count_brain = 0;

%SAR_muscle

Sm = load('835MHz_data_muscle(0.0001).txt'); % naložování souboru
globSAR_muscle = Sm(:,4); % čtvrtý sloupec s hodnotami SAR
detecm = isnan(globSAR_muscle); % detekce hodnot NaN -> vrací jedničku

for i = 1:1:length(globSAR_muscle);
    if detecm(i) == 1;
        globSAR_muscle(i) = 0 % tam, kde je detekován NaN se dosadí
nula
        count_muscle = count_muscle + 1; % počítadlo nulových prvků
    end
end

disp('Celková hodnota SAR pro svalovinu při frekvenci 835MHz je:')
SAR_muscle = sum(globSAR_muscle); % celková hodnota SAR pro svalovinu
disp(SAR_muscle)
disp(['W/kg'])
disp(' ')

%SAR_skull

Ss = load('835MHz_data_skull(0.0001).txt'); % naložování souboru
globSAR_skull = Ss(:,4); % čtvrtý sloupec s hodnotami SAR
detecs = isnan(globSAR_skull); % detekce hodnot NaN -> vrací jedničku

for i = 1:1:length(globSAR_skull);
    if detecs(i) == 1;
        globSAR_skull(i) = 0; % tam, kde je detekován NaN se dosadí
nula
        count_skull = count_skull + 1; % počítadlo nulových prvků
    end
end

disp('Celková hodnota SAR pro lebku při frekvenci 835MHz je:')
SAR_skull = sum(globSAR_skull); % celková hodnota SAR pro lebku
disp(SAR_skull)
disp(['W/kg'])
disp(' ')
```



```

%SAR_brain

Sb = load('835MHz_data_brain(0.0001).txt'); % naložování souboru
globSAR_brain = Sb(:,4); % čtvrtý sloupec s hodnotami SAR
detecb = isnan(globSAR_brain); % detekce hodnot NaN -> vrací jedničku

for i = 1:length(globSAR_brain);
    if detecb(i) == 1;
        globSAR_brain(i) = 0; % tam, kde je detekován NaN se dosadí
nula
        count_brain = count_brain + 1; % počítadlo nulových prvků
    end
end

disp('Celková hodnota SAR pro mozek při frekvenci 835MHz je:')
SAR_brain = sum(globSAR_brain); % celková hodnota SAR pro mozek
disp(SAR_brain)
disp(' [W/kg] ')
disp(' ')

%SAR_average

disp('Průměrná hodnota SAR pro všechny typy tkání při frekvenci 835MHz je:')
SAR_av = (SAR_brain + SAR_skull + SAR_muscle)/length(globSAR_muscle);
disp(SAR_av)
disp(' [W/kg] ')
disp(' ')

%SAR_av2 = (SAR_brain + SAR_skull +
SAR_muscle)/(length(globSAR_brain)-count_muscle +
length(globSAR_brain)-count_skull + length(globSAR_brain)-count_brain)

```

Příloha 2 - m - file pro stanovení průměrné hodnoty SAR - 1900 MHz

```
clear all
close all
clc

i = 0; % index
count_muscle = 0; % pocet nulovych prvku
count_skull = 0;
count_brain = 0;

%SAR_muscle

Sm = load('1900MHz_data_muscle(0.0001).txt'); % naložování souboru
globSAR_muscle = Sm(:,4)'; % čtvrtý sloupec s hodnotami SAR
detecm = isnan(globSAR_muscle); % detekce hodnot NaN -> vrací jedničku

for i = 1:1:length(globSAR_muscle);
    if detecm(i) == 1;
        globSAR_muscle(i) = 0; % tam, kde je detekován NaN se dosadí
nula
        count_muscle = count_muscle + 1; % počítadlo nulových prvků
    end
end

disp('Celková hodnota SAR pro svalovinu při frekvenci 1900MHz je:')
SAR_muscle = sum(globSAR_muscle); % celková hodnota SAR pro svalovinu
disp(SAR_muscle)
disp(['W/kg'])
disp(' ')

%SAR_skull

Ss = load('1900MHz_data_skull(0.0001).txt'); % naložování souboru
globSAR_skull = Ss(:,4)'; % čtvrtý sloupec s hodnotami SAR
detecs = isnan(globSAR_skull); % detekce hodnot NaN -> vrací jedničku

for i = 1:1:length(globSAR_skull);
    if detecs(i) == 1;
        globSAR_skull(i) = 0; % tam, kde je detekován NaN se dosadí
nula
        count_skull = count_skull + 1; % počítadlo nulových prvků
    end
end

disp('Celková hodnota SAR pro lebku při frekvenci 1900MHz je:')
SAR_skull = sum(globSAR_skull); % celková hodnota SAR pro lebku
disp(SAR_skull)
disp(['W/kg'])
disp(' ')

```

```

%SAR_brain

Sb = load('1900MHz_data_brain(0.0001).txt'); % naložování souboru
globSAR_brain = Sb(:,4); % čtvrtý sloupec s hodnotami SAR
detecb = isnan(globSAR_brain); % detekce hodnot NaN -> vrací jedničku

for i = 1:length(globSAR_brain);
    if detecb(i) == 1;
        globSAR_brain(i) = 0; % tam, kde je detekován NaN se dosadí
nula
        count_brain = count_brain + 1; % počítadlo nulových prvků
    end
end

disp('Celková hodnota SAR pro mozek při frekvenci 1900MHz je:')
SAR_brain = sum(globSAR_brain); % celková hodnota SAR pro mozek
disp(SAR_brain)
disp('[W/kg]')
disp(' ')

%SAR_average

disp('Průměrná hodnota SAR pro všechny typy tkání při frekvenci
1900MHz je:')
SAR_av = (SAR_brain + SAR_skull + SAR_muscle)/length(globSAR_muscle);
disp(SAR_av)
disp('[W/kg]')
disp(' ')

% SAR_av2 = (SAR_brain + SAR_skull +
SAR_muscle)/(length(globSAR_brain)-count_muscle +
length(globSAR_brain)-count_skull + length(globSAR_brain)-count_brain)

```

Příloha 3 - m - file pro stanovení průměrné teplotní změny - 835 MHz

```
clear all
close all
clc

i = 0; % index
count_dT = 0; % pocet nulovych prvku

%dT 835MHz

T = load('835MHz_data_dT(0.0001).txt'); % naložování souboru
glob_dT = T(:,4); % čtvrtý sloupec s hodnotami teplota
detecm = isnan(glob_dT); % detekce hodnot NaN -> vrací jedničku

for i = 1:length(glob_dT);
    if detecm(i) == 1;
        glob_dT(i) = 0; % tam, kde je detekován NaN se dosadí nula
        count_dT = count_dT + 1; % počítadlo nulových prvků
    end
end

disp('Celková teplotní změna pro 10 g tkane při frekvenci 835MHz je:')
dT = sum(glob_dT); % celková hodnota SAR pro svalovinu
disp(dT)
disp('[K]')
disp(' ')

%dT_average

disp('Průměrná teplotní změna pro 10 g tkane při frekvenci 835MHz je:')
dT_av = (dT)/length(glob_dT);
disp(dT_av)
disp('[K]')
disp(' ')
```

Příloha 4 - m - file pro stanovení průměrné teplotní změny - 1900 MHz

```
clear all
close all
clc

i = 0; % index
count_dT = 0; % pocet nulovych prvku

%dT 835MHz

T = load('1900MHz_data_dT(0.0001).txt'); % naložování souboru
glob_dT = T(:,4)'; % čtvrtý sloupec s hodnotami teplota
detecm = isnan(glob_dT); % detekce hodnot NaN -> vrací jedničku

for i = 1:length(glob_dT);
    if detecm(i) == 1;
        glob_dT(i) = 0; % tam, kde je detekován NaN se dosadí nula
        count_dT = count_dT + 1; % počítadlo nulových prvků
    end
end

disp('Celková teplotní změna pro 10 g tkane při frekvenci 1900MHz je:')
dT = sum(glob_dT); % celková hodnota SAR pro svalovinu
disp(dT)
disp('[K]')
disp(' ')

%dT_average

disp('Průměrná teplotní změna pro 10 g tkane při frekvenci 1900MHz je:')
dT_av = (dT)/length(glob_dT);
disp(dT_av)
disp('[K]')
disp(' ')
```